



HAL
open science

Suivi de l'effet morphologique du démantèlement des marges : validation des estimations de charriage par des observations in situ

Daniel Vázquez-Tarrío, Mathieu Cassel, Hervé Piégay, Thomas Depret, Fanny Arnaud, Christine Mouquet-Noppe, Kristell Michel, Brice Noirot, Lise Vaudor, Christophe Mora, et al.

► To cite this version:

Daniel Vázquez-Tarrío, Mathieu Cassel, Hervé Piégay, Thomas Depret, Fanny Arnaud, et al.. Suivi de l'effet morphologique du démantèlement des marges : validation des estimations de charriage par des observations in situ. [Rapport de recherche] CNRS UMR 5600 - EVS; CNR. 2021. hal-03291004

HAL Id: hal-03291004

<https://hal.science/hal-03291004>

Submitted on 19 Jul 2021

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

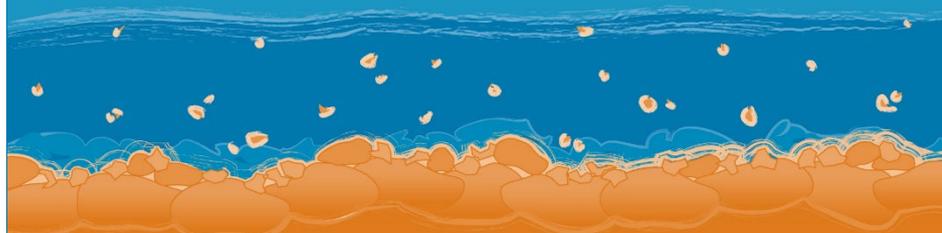
Suivi de l'effet morphologique du démantèlement des marges : validation des estimations de charriage par des observations *in situ*

OSR5 2018-2020

Rapport final



Plan
Rhône



Suivi de l'effet morphologique du démantèlement des marges : validation des estimations de charriage par des observations *in situ*

Rapport final – Version du 15 juin 2021

Axe A	Redynamisation des marges alluviales : faisabilité, risques, opportunités
Action A.2	Charge de fond et redynamisation du chenal
Sous-Action A.2.4	Suivi de l'effet morphologique du démantèlement des marges

Personnes impliquées	Equipe de recherche
Daniel Vázquez Tarrío Mathieu Cassel Hervé Piégay Thomas Dépret Fanny Arnaud Christine Mouquet-Noppe Kristell Michel Brice Noirot Lise Vaudor	CNRS - UMR 5600 EVS
Christophe Mora Lionel Meric	CNR

Pour citer ce document :

Vázquez Tarrío D., Cassel M., Piégay H., Dépret T., Arnaud F., Mouquet-Noppe C., Michel K., Noirot B., Vaudor L., Mora C., Meric L. (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, 58 p.

Résumé

Le présent rapport fait état des travaux menés entre 2019 et 2020, dans le cadre des observations in situ du transport par charriage lors du suivi des effets morphologiques du démantèlement des marges, constituant l'Action A2.4 de l'OSR5. Nous présentons successivement les sites d'étude et les méthodes employées ainsi que les suivis réalisés. Les données ont été intégrées dans une base de données afin de pouvoir réaliser une analyse comparative de ces suivis. Nous utilisons ainsi ces données pour mieux caractériser les débits critiques de mise en mouvement, la taille des particules mobiles et les liens entre distances de transport et conditions hydrauliques locales, dans les différents secteurs du Rhône étudiés. Ensuite, nous mettons ces observations en relation avec le travail de modélisation hydrosédimentaire réalisé dans le cadre de l'OSR4 afin de proposer une démarche qui permette de modéliser les temps de transit du sédiment dans le Rhône, lors des opérations de recharge en sédiment à venir. Nous testons le potentiel de cette approche en modélisant les recharges sédimentaires déjà réalisées dans les secteurs de Péage-de-Roussillon et Donzère. Enfin, nous proposons quelques perspectives et développements futurs, pour avancer dans la compréhension du transport par charriage sur le Rhône.

Mots-clés

OSR ; Rhône ; Charge de fond ; Traceurs RFID ; Vitesse de déplacement ; Compétence ; Granulométrie ; Restauration du transport solide ; Monitoring ; Modélisation

1. INTRODUCTION	5
2. LES SITES D'ÉTUDE	5
2.1. Présentation générale des sites et traçages	5
2.2. Le Vieux-Rhône de Chautagne	8
2.3. Le barrage de Jons sur le canal de Miribel	10
2.4. La brèche de Neyron sur le canal de Miribel	13
2.5. La Réinjection de la Platière à Péage	15
2.6. L'Île des Gravieres à Péage	18
2.7. L'Île des Dames à Donzère	21
3. ANALYSE DES DONNÉES	25
3.1. Analyse des effets de taille	25
3.1.1. Le Vieux Rhône de Chautagne	25
3.1.2. Le barrage de Jons et le canal de Miribel	26
3.1.3. La réinjection de la Platière à Péage de Roussillon	27
3.1.4. L'île des Gravières à Péage de Roussillon	28
3.1.5. L'île des Dames à Donzère	28
3.1.6. Synthèse	29
3.2. Estimation des débits critiques	31
3.3. Analyse de la compétence de l'écoulement	34
3.4. Contrôles hydrauliques sur les distances de transport	38
3.5. Comparaison entre la distance mesurée et l'estimation de la capacité de transport par charriage	42
4. EVALUATION DU TEMPS NECESSAIRE A L'EXPORT DU SÉDIMENT HORS DES RCC	44
4.1. Introduction	44
4.2. Présentation de la méthodologie	45
4.3. Estimation des capacités de transport par charriage	46
4.4. Estimation des distances de transport	48
4.5. Implémentation	50
4.6. Exemples d'application	51
4.6.1. La réinjection de la Platière à Péage de Roussillon	51
4.6.2. La recharge sédimentaire à Donzère	52

4.7. Limites	54
5. CONCLUSIONS / PERSPECTIVES	55
6. REFERENCES	57

1. INTRODUCTION

Le présent rapport fait état des travaux menés entre 2019 et décembre 2020 dans le cadre des observations (in situ) de transport par charriage lors du suivi des effets morphologiques du démantèlement des marges, prolongeant l'Action A2.4 de l'OSR5 (Figure 1). En 2019 et 2020, ces travaux ont été divisés en quatre axes :

- l'équipement en traceurs sédimentaires par RFID (actif) et la réalisation des suivis terrain des sites de :
 - *L'île des Gravieres*, localisée dans le secteur de Péage-de-Roussillon,
 - *L'île des Dames*, dans le secteur de Donzère-Mondragon.
- le rééquipement en traceurs sédimentaires RFID (actifs) du site de *Jons-Canal de Miribel*.
- la constitution d'une base de données intégrant tous les suivis, passés ou en cours, de traçage sédimentaire par RFID menés sur le Rhône. Ce travail permet en effet d'analyser toutes les données synoptiquement et de maximiser ainsi la compréhension des processus, en intégrant les différentes situations hydrologiques et morphologiques.
- le traitement des données afin d'apporter des éléments de validation des estimations de transport par charriage réalisées dans le cadre de l'OSR4, et d'avancer dans le développement de modèles à visée prédictive de la propagation des graviers dans les tronçons court-circuités du Rhône.

Dans un premier temps, nous ferons dans ce rapport une présentation générale des six sites d'étude, des méthodes de traçage sédimentaires employées, des calendriers d'équipement et des suivis réalisés. Puis, nous analyserons les suivis réalisés et les données collectées et contextualisées dans la chronique hydrologique.

Nous analysons ensuite les données dérivées des différents suivis de traçage sédimentaire, afin de tirer le maximum d'informations permettant de caractériser le transport de sédiment par charriage sur le Rhône.

Enfin, les données des suivis RFID sont utilisées pour développer un protocole méthodologique permettant la prédiction des distances de transport et des temps d'exportation des particules sédimentaires en dehors d'un RCC, lors des opérations de recharge sédimentaire.

2. LES SITES D'ÉTUDE

2.1. Présentation générale des sites et traçages

Les six sites d'étude suivis dans le cadre de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) sont répartis sur quatre secteurs court-circuités du Rhône. On retrouve d'amont en aval (Figure 1) :

- le Vieux-Rhône de Chautagne (sur le secteur OSR éponyme) qui s'étend du point kilométrique (Pk) -145.9 au Pk -137 (les Pk sont, pour le dire de manière simplifiée, négatifs en amont de Lyon et positifs en aval). Le site de la Réinjection de *Motz* (codé MOTZ) se situe au Pk 145.6 ;
- le canal de Miribel (sur le secteur OSR de Lyon-Miribel), qui s'étend du Pk -25.4 au Pk -9.2, et qui comprend deux sites d'étude :
 - *le barrage de Jons* (codé JONS) au Pk -25.4 ;

- *la Brèche de Neyron* (codé NEYRON) au Pk -13.6 ;
- le Vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon (secteur OSR éponyme), qui s'étend du PK 51 au Pk 63.5, et qui comprend également deux sites d'étude :
 - *la réinjection de la Platière* (codée REINJ) au Pk 52.5,
 - *la restauration de l'île des Graviers* à la Platière (codée MARGE) au Pk 54.75.
- Le Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon (secteur OSR éponyme), qui s'étend du Pk 171.5 au Pk 200.5 et sur lequel on retrouve, au Pk 176, le site de restauration de l'île des Dames (codé DAMES).

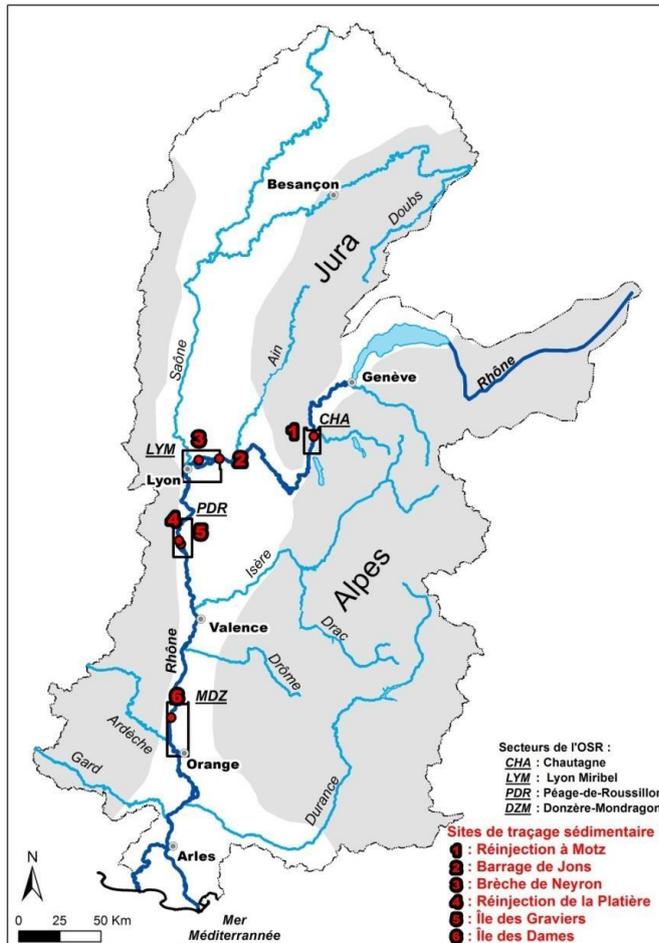


Figure 1. Répartition des six sites rhodaniens sur lesquels un traçage sédimentaire fait l'objet de suivis

Ainsi, les 6 sites d'études sont répartis sur environ 190 kilomètres du linéaire du fleuve et sur des tronçons court-circuités qui présentent des caractéristiques morphologiques contrastées qui sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques générales des tronçons sur lesquels sont réalisés les traçages sédimentaires.

Sites	Surface du BV (en km ²)	Débit pour Q2 (m3/s)	Pente moy* du RCC/TCC (en m/m)	Largeur moy. du chenal - Lc - (en m)	Largeur moy. bande active - Lba - (en m)	Lc/Lba	D ₅₀ moyen de Parrot (2015) (en mm)
MOTZ	12 737	469	0.000 76	93.4	280	3.00	45
JONS	20 097	1 255	0.000 69	70.3	118	1.68	30
NEYRON			0.000 42	79.6	80	1.00	23
REINJ	52 254	1 608	0.000 42	94	192	2.04	71
MARGE			0.000 39				
DAMES	71 318	2 018	0.000 79	146	181	1.24	48

* : les pentes moyennes sont établies à partir des altitudes moyennes des profils en travers de MAGE entre les profils aval du RCC et le profil en travers à l'amont directe des zones d'injection des traçages sédimentaires.

Ces expériences de traçage sédimentaire ont été réalisées ou financées par plusieurs opérateurs (Compagnie Nationale du Rhône - CNR, Réserve Naturelle de la Platière - RNP, BURGEAP / Métropole de Lyon et Observatoire des sédiments du Rhône - OSR) et maîtres d'œuvre (Geopeka, laboratoire Environnement Ville Société du CNRS - EVS et CNR) mais sont bancarisées par l'OSR. Elles reposent en outre sur des objectifs et des contextes expérimentaux distincts qui ont contribué à des choix techniques, des protocoles et des calendriers eux-mêmes différents, comme cela est résumé dans le tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques des traçages sédimentaires sur le Rhône.

Sites	Responsable Projet / MO	Contexte expérimental	Type de RFID	Nb de classes granulo	D _{16/40/50/84/90} des traceurs (en mm)	Début de traçage	Qc* (en m3/s)
MOTZ	CNR / GeoPeka	Injection sédimentaire	PIT tags : 23-32 mm	5	<u>27/34</u> /38.5/54.5/64.4	déc-16	498 ⁽¹⁾ 603 ⁽²⁾
JONS	OSR4 / EVS	Transparence sédimentaire	a-UHF tags : COIN-HC	4	<u>44.5/59.5</u> /63.7/108/109	oct-16	981 ⁽¹⁾ 1080 ⁽²⁾
NEYRON	Métropole de Lyon / GINGER / Burgeap / EVS	Etude du transit sédimentaire en amont de Lyon	a-UHF tags: COIN-ID	1	<u>44.5</u> /.../.../44.5	janv-17	1288 ⁽¹⁾ 2139 ⁽²⁾
REINJ	RNP/ GeoPeka	Injection sédimentaire	PIT tags : 12-23-32 mm	6	<u>12/20</u> /24/54.5/54.5	avr-17	452 ⁽¹⁾ 349 ⁽²⁾
MARGE	OSR5 / EVS	Démantèlement de digues et casiers	PIT tags : 23-32 mm	4	<u>29/38.5</u> /43/69/77	févr-19	1343 ⁽¹⁾ 1453 ⁽²⁾
DAMES	CNR / CNR + appui EVS	Injection sédimentaire	PIT tags : 23-32 mm	4	<u>28/38</u> /42/67/77	avr-19	880 ⁽¹⁾ 955 ⁽²⁾

Qc* : les débits critiques de mise en mouvement des traceurs estimés par les modèles de Schoklitsch⁽¹⁾ et Bathrust⁽²⁾ en utilisant la pente moy. indiquée dans le tableau 1 et les D₄₀ et D₁₆ des traceurs respectivement pour Schoklitsch et Bathrust.

Enfin, le calendrier des expérimentations de traçage sédimentaire est également présenté ci-dessous (Tableau 3), en précisant notamment les différentes phases d'injection (installation des traceurs) et des suivis. Ces expérimentations s'étendent de 2016 à 2020. Des éléments d'explication seront fournis au cas par cas dans les sections suivantes.

Tableau 3. Calendrier d'injection et de suivi des traceurs sédimentaires sur les sites étudiés.

Calendrier		2016		2017				2018				2019				2020			
RCC	Sites	O-N-D	J-F-M	A-M-J	J-A-S	O-N-D													
CHA	MOTZ	Inj		S1			S2												
MIR	JONS	Inj	S1				S2	S2									Inj		
	NEYR		Inj	S1			S2	S2											
PDR	REINJ			Inj	S1				S2		S3	S4							
	GRAVIER										Inj				S1			S2	
DZM	DAMES											Inj	S1					S2	

Ces premiers éléments seront importants pour l'interprétation des résultats. La base de données est maintenant bien établie. Nous allons tirer parti au mieux de ce jeu de données unique pour évaluer les prochains scénarios de recharge sédimentaire et modéliser la vitesse des transferts sédimentaires.

2.2. Le Vieux-Rhône de Chautagne

Un stock de 15 000 m³ de sédiments provenant de deux dragages réalisés respectivement à la confluence *Des Usses* et du *Rhône* et dans la retenue de Seyssel, a été réinjecté dans le fleuve quelques 400 mètres en aval du Barrage de Motz (environ 6.5 km à l'aval de leur lieu d'origine). Le D₅₀ du stock de sédiments calculé sur 6 échantillons provenant des 2 sites de dragage est de 16.8 mm. L'introduction de ces sédiments en rive droite du chenal du Vieux-Rhône a été réalisée entre novembre et décembre 2016 sous la forme d'un merlon de quelques 350 mètres de long. La CNR, qui s'interroge sur les effets d'une telle opération sur le chenal et le devenir des sédiments réinjectés, a commandé des suivis topobathymétriques et un traçage sédimentaire.

Le 21 décembre 2016, une fois le stock de sédiments introduit, 888 traceurs ont été injectés. Ceux-ci étaient équipés de PIT tags (23 et 32 mm de long) et étaient répartis en 5 classes granulométriques (Tableau 4). Ils ont été répartis en 40 clusters comprenant 19 à 23 individus (Figure 2) sur 5 secteurs morphologiques. Quatre clusters ont été positionnés dans le chenal en amont du merlon (1) ; 19 clusters ont été répartis sur les flancs du merlon (2), 2 dans la zone de convexité en rive droite en aval du merlon (3), 9 dans la zone de concavité en rive gauche en aval du merlon (4) et 4 autres sur un radier localisé environ 750 m en aval du merlon (5).

Tableau 4. Répartition par classes granulométriques des traceurs injectés à Motz (Source : GeoPeka).

Classes granulométriques (mm)	22-32	32-45	45-64	64-90	90-128	Total
Nb de traceurs	222	271	254	89	52	888
Part des traceurs	25%	31%	29%	10%	05%	
Fréquences cumulées	0.25	0.56	0.85	0.95	1	



Figure 2. Localisation des injections des traceurs à Motz en fonction de la bathymétrie initiale (Source : GeoPeka).

Deux suivis, combinant prospection pédestre et embarcation motorisée (voir détails dans le rapport rédigé par GeoPeka), ont été réalisés sur une durée de 4 jours et achevés respectivement le 7 décembre 2017 et le 30 mars 2018. Ils ont enregistré une activité hydrologique très contrastée (Figure 3) :

- faible entre l'injection et le premier suivi (E1) : un débit maximal de $260 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, inférieur aux estimations préliminaires du Q_c (Tableau 2) et, considérant un Q_c moins élevé de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ (issu du rapport « *Gestion de la végétation sur les bancs de galets du vieux Rhône de Chautagne* »), une durée cumulée de crue inférieure à 6 jours (133 hrs)
- intense entre le premier et le second suivi (E2) : un débit maximal de $1933 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, largement supérieur aux premières estimations du Q_c et une durée de crue cumulée de près de 12 jours (281 hrs).

De fait, les résultats de ces suivis sont également contrastés, notamment du point de vue des distances de transport observées (Tableau 5).

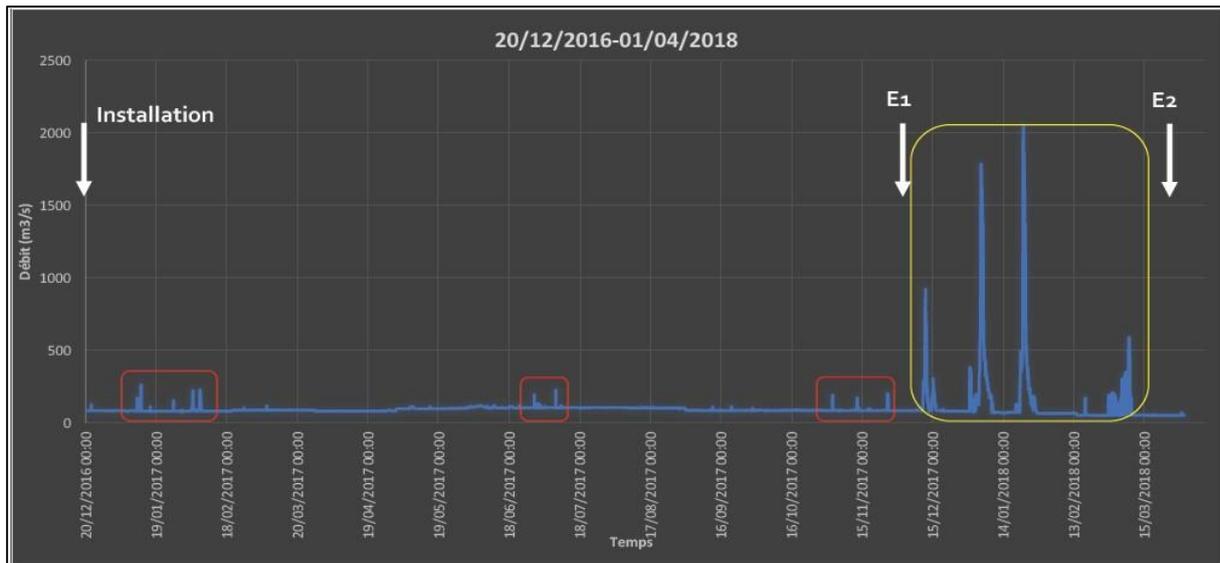


Figure 3. Chronique hydrologique des débits dans le Vieux-Rhône de Chautagne (Source GeoPeKa).

Tableau 5. Synthèse des métriques descriptives des deux suivis de traçage sédimentaire opérés à Motz.

Suivi	Tps de prospection	Surface prospectée	Date de fin	Tx de retour	Distance moy. (en m)	Distance max. (en m)
E1	31 hrs	3.6 ha	07/12/2017	30.2 %	9	75
E2	22 hrs	9.3 ha	30/04/2018	24.0 %	371	1341

En outre, le premier suivi présente les valeurs de distances de transport observées pour la plupart inférieures à la marge d'erreur de géopositionnement (c.-à-d. 12m) et le taux de retour est probablement affecté par les problèmes de collision des signaux basse-fréquence des transpondeurs passifs du fait de leur proximité, les traceurs n'ayant pas ou peu bougé et ayant été installés en clusters. Il est possible que le merlon d'introduction ait eu un effet hydraulique puisqu'un petit nombre de particules ont été significativement déplacées malgré des valeurs maximales de débits très inférieurs aux Q_c initialement estimés.

Lors du second suivi, la prospection a été limitée dans l'espace (seuil infranchissable à l'aval) et le temps, ce qui a entraîné un taux de retour plutôt faible. Lors de ce second suivi, on n'observe pas d'effet important de l'emplacement d'injection initial.

2.3. Le barrage de Jons sur le canal de Miribel

Les éléments de cette section s'appuient sur le rapport suivant :

- Rapport de synthèse de l'OSR 4 « Mesures et modélisations du fonctionnement hydrosédimentaire du secteur de Miribel-Jonage » de Dépret et al., de janvier 2018.

Le secteur de Miribel s'étend du barrage de Jons jusqu'à l'entrée dans Lyon au niveau du pont Poincaré, immédiatement à la confluence des canaux de Miribel et de Jonage. Grâce aux apports sédimentaires de la rivière d'Ain (30 à 40 000 m³/an), dont la confluence se situe environ 8 kilomètres en amont du barrage de Jons et aux modalités de gestion de cet ouvrage, le secteur présente un transport solide par charriage relativement préservé et considéré comme une référence de bon fonctionnement sur le linéaire du fleuve Rhône.

Dans le cadre de l'action I.2 de l'OSR4 2015-2017 (Dépret et al., 2018), le site a été équipé de 200 traceurs sédimentaires composés de transpondeurs RFID actifs ultra hautes fréquences moulés dans des galets artificiels d'une densité de 2,65 g/cm³. Ces 200 traceurs sont équitablement répartis (n = 50) entre 4 classes de taille (Tableau 6).

Tableau 6. Répartition par classes granulométriques des traceurs injectés à Jons.

Classes granulométriques (mm)	32-45	45-64	64-90	90-128	Total
Nb de traceurs	50	50	50	50	200
Part des traceurs	25%	25%	25%	25%	
Fréquences cumulées	0.25	0.50	0.75	1	

Ces traceurs ont été injectés en octobre 2016, le long de 4 profils composés chacun de cinq clusters de dix traceurs (Figure 4). Deux profils sont localisés dans la retenue, 430 et 650 mètres à l'amont du barrage. Les deux autres profils sont localisés 230 et 440 mètres à l'aval du barrage.



Figure 4. Localisation des injections des traceurs à Jons.

Deux suivis, combinant prospection pédestre et embarcation motorisée, ont été réalisés sur des durées de 2 et 8 jours et achevés respectivement les 31 mars 2017 et 26 septembre 2018.

Lors de ces suivis, une activité hydrologique très contrastée a été enregistrée (Figure 5 – repères orange) :

- faible entre l'injection et le premier suivi (E1) : un débit maximal de 1021 m³.s⁻¹, proche de Qc initialement estimé (Tableau 2) et une durée cumulée de crue approchant les 5 jours (80 heures);
- intense entre le premier et le second suivi (E2) : un débit maximal de 2322 m³.s⁻¹, largement supérieur au Qc préliminairement estimé et une durée de crue cumulée de près de 37 jours (1052 hrs).

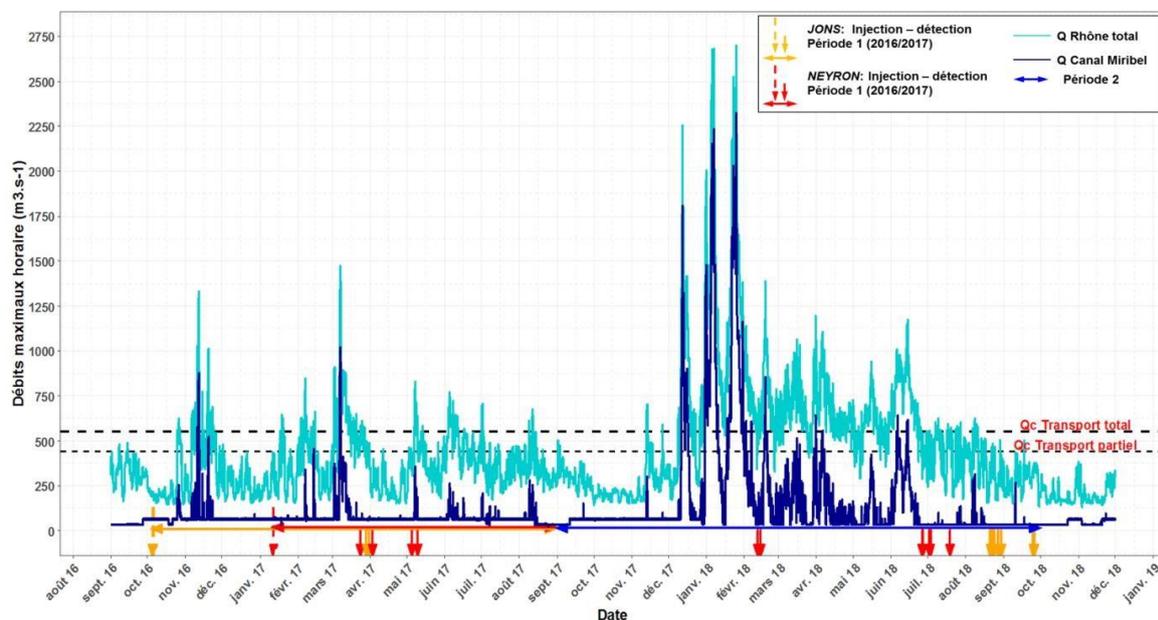


Figure 5. Chronique hydrologique des débits dans le canal de Miribel et le Rhône total à Jons.

Ces deux suivis sont extrêmement contrastés qu'il s'agisse du temps et de l'effort de prospection consentis, du taux de retour ou encore des distances de transport observées (Tableau 7).

Tableau 7. Synthèse des métriques descriptives des deux suivis de traçage sédimentaire opérés à Jons.

Suivi	Tps. de prospection	Surface prospectée	Date de fin	Taux de retour	Distance moy. (en m)	Distance max (en m)
E1	64 hrs	12.1 ha	31/03/2017	*70%	448	1066
E2	108 hrs	42.2 ha	26/09/2018	04%	1411	3368

* : 70/100 traceurs injectés en aval du barrage. Les 100 injectés en amont n'ont pas pu être recherchés 2017

Les résultats de ces suivis sont analysés en détail dans les rapports mentionnés en introduction de section. Retenons pour résumer que :

- Le bon taux de retour du premier suivi n'a pas pu être répété au cours du second suivi, probablement à cause d'une défaillance matérielle consécutive à la réduction de la taille des capsules des transpondeurs ;

- Le premier suivi indiquait un effet de la taille sur la mobilité et les distances de transport des traceurs, mais l'injection dans la veine d'eau rapide du chenal a pu produire une surexposition et favoriser le transport des particules ;
- Le faible nombre de particules retrouvées à E2 ne permet pas de conduire la même analyse pour la période à l'activité hydrologique la plus marquée. Ce suivi reste riche d'enseignement confirmant le franchissement du barrage de Jons par plusieurs particules, la mobilité et le transport de particules très grossières qu'il faudra comparer aux estimations du diamètre maximal mobilisable pour des crues de référence.

Suite à la perte presque totale des traceurs lors du deuxième suivi, le site de Jons a été rééquipé en août 2020 dans le cadre d'un financement OHM – Vallée du Rhône (matériel et stage de master). Ainsi, le site a été équipé de 199 traceurs sédimentaires composés de transpondeurs RFID actifs ultra-hautes fréquences, moulés dans des galets artificiels d'une densité de 2,65 g/cm³. Comme pour le premier suivi (2016 à 2018), ces 199 traceurs ont été équitablement répartis (n = 50) entre quatre classes de taille (Tableau 6), et distribués le long de 2 profils dans la retenue (50 traceurs) et de 4 profils localisés à l'aval du barrage. Le mode d'injection diffère entre les opérations de 2016 et 2020. Alors qu'à l'amont de la retenue, les traceurs avaient été injectés en amas en 2016, ils l'ont été en chapelet en 2020 afin de mieux représenter la dimension spatiale du charriage dans la retenue. A l'aval, la plus faible largeur du chenal et les courants rapides qui y sont observés n'ont pas permis de disposer des conditions de navigabilité permettant l'injection en chapelet et le mode opératoire en amas a été répété.

2.4. La brèche de Neyron sur le canal de Miribel

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

- Rapport de synthèse de l'OSR 4 « *Mesures et modélisations du fonctionnement hydrosédimentaire du secteur de Miribel-Jonage* » de Dépret et al., de janvier 2018.

À l'aval du secteur de JONS, le canal de Miribel se divise en deux bras que sépare le champ de captage de Crépieux-Charmy : au nord, le canal de Miribel, et au sud, le Vieux Rhône de Neyron. Quelque 30 à 40 000 m³/an de sédiments transitent ici dans le canal de Miribel. La question de la répartition des flux entre les deux bras a conduit le bureau d'étude GINGER Burgeap (maître d'œuvre d'une étude du transit sédimentaire par charriage en amont de Lyon commandée par la métropole Lyonnaise) à équiper le site en partenariat avec le laboratoire EVS. Contrairement au site de Jons, les traceurs ont tous été façonnés avec le même axe *b* de 44,5 mm car cette valeur se rapproche le mieux de la granulométrie des dépôts du delta du Vieux Rhône de Neyron, telle que caractérisée par GINGER Burgeap.

Une centaine de traceurs sédimentaires artificiels équipés de transpondeurs *a-UHF* (modèle COIN ID, raboté avec un touret), a été déployée en janvier 2017 en amont de la diffluence sous la forme de 5 clusters composés de 5 traceurs chacun et localisés le long de 4 profils (Figure 6).

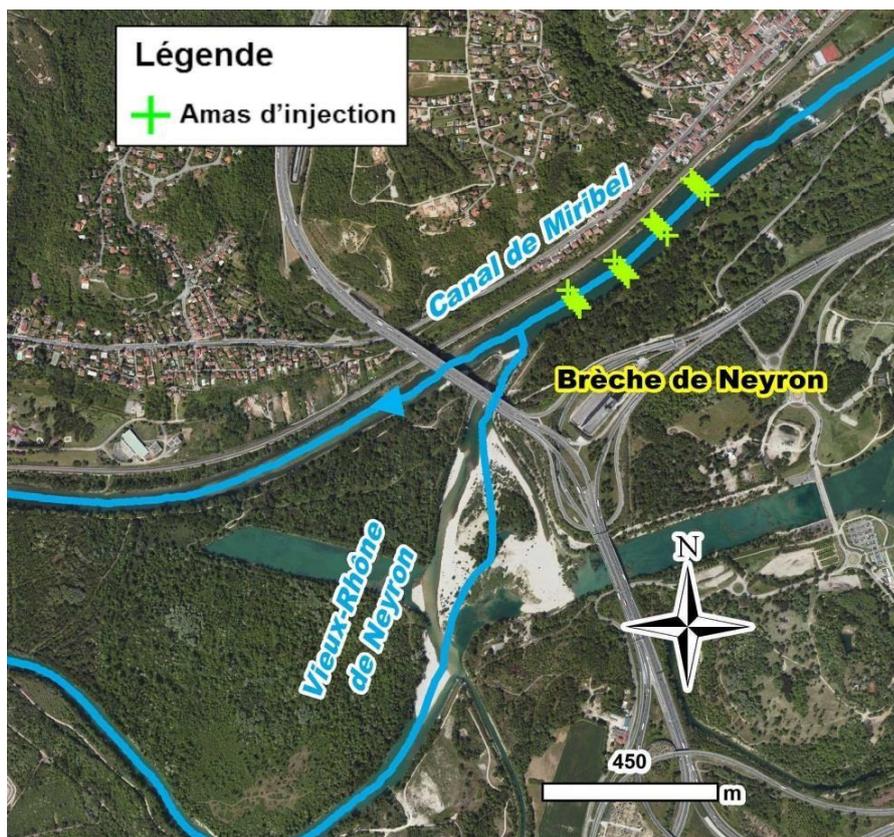


Figure 6. Localisation des injections des traceurs sur le canal de Miribel à l'amont de la brèche de Neyron.

Deux suivis, combinant prospection pédestre et embarcation motorisée ont été réalisés, sur des durées de 4 jours et 7 jours. Ils ont été achevés respectivement les 10 mai 2017 et 19 août 2018.

Ils ont enregistré une activité hydrologique très contrastée (Figure 5- repères rouges) :

- faible entre l'injection et le premier suivi E1: un débit maximal de $1021 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, voisin de Q_c initialement estimé (Tableau 2) et une durée cumulée de de crue approchant les 2 jours (39 heures) ,
- intense entre le premier et le second suivi (E2) : un débit maximal de $2322 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, largement supérieur au Q_c estimé de façon préliminaire et une durée de crue de près de 37 jours (1052 heures).

Tableau 8. Synthèse des métriques descriptives des deux suivis de traçage sédimentaire opérés à Neyron.

Suivi	Tps de prospection	Surface prospectée	Date de fin	Tx de retour	Distance moy. (en m)	Distance max. (en m)
E1	88 hrs	7.7 ha	10/05/2017	64 %	114	266
E2	108 hrs	29.3 ha	19/08/2018	55 %	1343	2955



Figure 7. Localisation et trajectoire des traceurs de la brèche de Neyron après deux suivis.

Les résultats de ces suivis ont été analysés en détail dans les rapports mentionnés en introduction de section. Retenons pour résumer (Tableau 8) :

- Les bons taux de retour pour les deux suivis : $\geq 55\%$.
- Si on considère l'apport moyen annuel d'un volume de 30 à 40 000 m³ par l'Ain comme suffisamment stable dans le temps pour ce que volume soit actuellement en transit en amont de la brèche de Neyron, le delta capterait 60% de ce transit, soit 18 à 24 000 m³. Ceci est du même ordre de grandeur que les 28 000 et 10 000 m³ d'apports estimés entre 2004/2005 et 2005/2006 par Malavoi (2008) qui a jugé comme étant plus plausible la seconde valeur. C'est également cohérent avec les données de Gilles et al. (2018) qui estimait ce volume à 22 000 m³ en employant des données (apport de l'Ain + répartition entre les canaux) similaires à celles présentées ici.
- Les particules tracées ayant été transportées dans le canal de Miribel présentent des distances de déplacement jusqu'à 2,1 fois supérieures à celles observées dans le Vieux-Rhône de Neyron (Figure 7).
- Ainsi, si le canal de Miribel ne capte environ que 1/3 du flux de sédiment provenant de l'amont, il tend à les transporter plus loin ou plus rapidement.
- La principale zone de dépôt située en aval du delta de Neyron a été curée après l'important épisode de crue de l'hiver 2017/2018 ce qui a conduit à abandonner ce suivi, déjà singulier par rapport aux autres dans la mesure où une seule classe granulométrique avait été équipée.

2.5. La Réinjection de la Platière à Péage

L'Île des Gravieres est située en rive gauche du RCC de Péage-de-Roussillon dans la RN de la Platière. Elle est délimitée par le Vieux-Rhône à l'Ouest et la Lône de la Platière à l'Est. Entre décembre 2016 et mars 2017, la CNR a mené d'importants travaux de démantèlement d'un complexe de casiers Girardon (une dizaine de casiers, une digue longitudinale et ses épis plongeants) sur un linéaire d'environ 1500 mètres. Il a été décidé de réinjecter les sédiments extraits au cours de cette opération de

démantèlement des marges dans le Vieux-Rhône, en amont du site des travaux et en aval du barrage de Saint-Pierre-de-Boeuf. La Réserve Naturelle de la Platière a commandé à GeoPeka un suivi de cette réinjection et plus précisément du déplacement des particules les plus grossières.

Le 14 mars 2017, une fois le stock de sédiments introduit, 991 traceurs équipés de PIT tags (12, 23 et 32 mm de long) répartis en 5 classes granulométriques (Tableau 9) ont été injectés. Ils ont été installés en 20 clusters comprenant une soixantaine de traceurs (Figure 8) et répartis comme suit : 5 dans le chenal à droite du merlon et 15 sur le sommet du merlon.

Tableau 9. Répartition par classes granulométriques des traceurs injectés à la Platière (Source : GeoPeka).

Classes granulométriques (mm)	08 - 16	16 - 32	32-45	45-64	64-90	Total
Nb 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 8. Localisation des clusters de traceurs sur le site de réinjection de sédiment de la Platière.

Trois suivis, combinant prospection pédestre et embarcation motorisée ont été réalisés sur des durées de 4, 7, 1 et 1 jours. Ils ont été achevés respectivement les 10 mai 2017, 05 juillet 2018 et 28 février 2019 et 14 mai 2019.

Ces suivis ont encore une fois enregistré une activité hydrologique très contrastée (Figure 9) :

- très faible entre l'injection et le premier suivi E1 : un débit maximal de 500 m³/s, bien inférieur au Qc initialement estimé (Tableau 2) et une durée cumulée de crue inférieure à 3 jrs,
- très intense entre E1 et E2 : trois pics de crue successifs dépassant Qc estimé et atteignant respectivement 1712, 2600 et 3021 m³/s auxquels succède une crue de moindre ampleur (pic

inférieur à Q_c estimé dans le Tableau 2), très faible entre E2 et E3 : un pic de crue inférieur à Q_c culminant à $972 \text{ m}^3/\text{s}$ en mars 2019 entre E2b et E3.

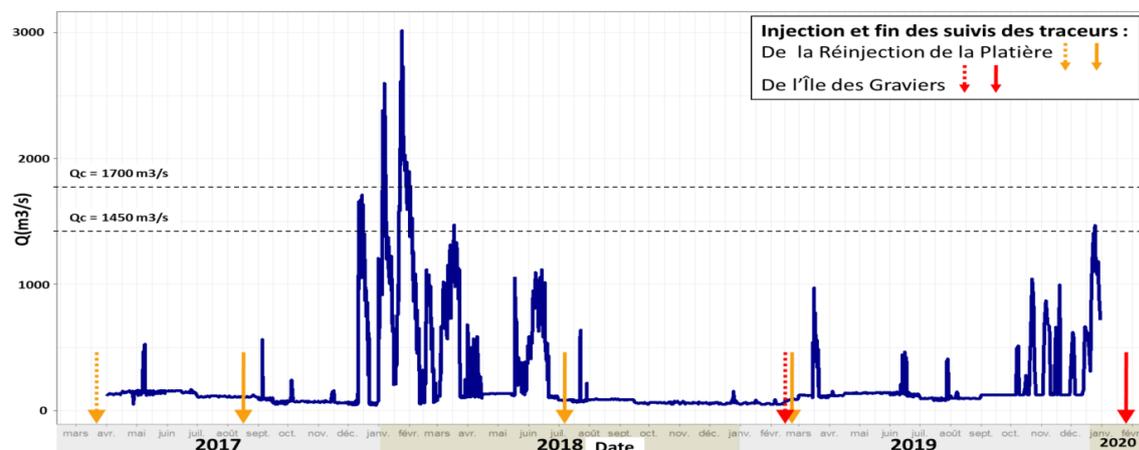


Figure 9. Chronique hydrologique des débits dans le Vieux Rhône de Péage-de-Roussillon.

Assez logiquement, on observe donc :

- que le premier suivi n'enregistre que des déplacements mineurs (Tableau 10), résultant probablement de phénomènes hydrauliques locaux provoqués par la présence du merlon de réinjection des sédiments et de l'évolution progressive de sa géométrie.
- Les distances de transport observées au cours des suivis postérieurs (E2, E2b et E3) résultent de la crue de l'hiver 2017/2018. Les distributions des distances de transport ne sont pas affectées par la taille des particules, mais une tendance à la sédimentation temporaire des plus petites classes granulométriques est observée malgré tout sur le banc immédiatement à l'aval du merlon alors que les plus grossières sont localisées dans le chenal. La faible part des particules retrouvées initialement injectées dans le chenal rend la comparaison « injection sur le merlon vs injection dans le chenal » délicate. Si on en fait abstraction, il semble que les particules du merlon aient été transportées plus loin.

Tableau 10. Synthèse des métriques descriptives des suivis de traçage sédimentaire opérés sur le site de la Réinjection de la Platière.

Suivi	Tps de prospection	Surface prospectée	Date de fin	Tx de retour	Distance moy. (en m)	Distance max. (en m)
E1	10 hrs	2.0 ha	16/08/2017	8.3 %	11	41
E2	50 hrs	18.6 ha	05/07/2018	35.8 %	393	1769
E2b	6 hrs	3.8 ha	28/02/2019	* 36.8 %	467	1962
E3	4 hrs	1.1 ha	14/05/2019	7.5 %	285	636

* : Taux de retour incluant les traceurs détectés à E2 et E2b
Les valeurs de distance de transport ont été établies depuis la position d'injection

2.6. L'Île des Gravier à Péage

En complément du suivi des sédiments réinjectés en amont du RCC de Péage-de-Roussillon (RNP et Geopeka), nous avons également réalisé un second suivi à l'Île des Gravier dans le cadre de cette action A.2.4 de l'OSR5. L'objectif de ce suivi est de mieux comprendre la réactivation du transport sédimentaire et de l'érosion de la berge après le démantèlement des casiers par la CNR (12/2016 à 03/2017). Les premières crues à la suite des travaux de l'hiver (2017/2018) ayant exhumé de nouveaux blocs d'enrochement, une nouvelle intervention destinée à rompre la carapace en formation et réactiver davantage les processus de remise en mouvement des particules a été réalisée en décembre 2018.

En concertation avec les gestionnaires de la Réserve Naturelle, 999 traceurs équi-répartis entre quatre classes granulométriques (Tableau 11) ont été déployés le 5 février 2019 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 10).

Tableau 11. Répartition par classes granulométriques des traceurs injectés à l'Île des Gravier.

Classes granulométriques (mm)	16 - 32	32 - 45	45 - 64	64 - 90	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 10. Localisation des injections le long de la berge restaurée de l'Île des Gravier.

En raison des faibles hauteurs d'eau observées au débit réservé d'hiver, il a été possible d'installer les traceurs en respectant un espacement entre particules pour limiter les risques de collision de signaux (voir le rapport intermédiaire de mars 2019 pour plus de détail).

Un suivi a été réalisé le 29 janvier 2020, qui a enregistré une activité hydrologique relativement faible avec deux événements de crue relativement mineurs (Figure 9) :

- un pic, inférieur à Q_c estimé au début (Tableau 2), culminant à $972 \text{ m}^3/\text{s}$ en mars 2019,
- une période d'environ 6 jours avec un pic débit maximal dépassant légèrement les Q_c estimés (Tableau 2) et culminant à $1470 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ce suivi réalisé lors d'une journée a mobilisé 4 et 3 opérateurs entre respectivement 10h et 12h30 et 13h et 15h. Ceux-ci ont utilisé simultanément 2 systèmes de prospection pour plus de rapidité.

Malgré une activité hydrologique plus faible que celles observées lors des suivis réalisés sur les sites décrits précédemment, ce premier suivi de l'Île des Gravier est riche d'enseignement (Figure 11) :

- Il valide la stratégie d'implantation des traceurs sur un carroyage qui devrait être privilégiée lorsque c'est possible afin de minimiser les problèmes de collision des signaux.
- Il a permis une analyse de la précision des systèmes de détection et de géolocalisation des traceurs à l'origine de recommandations opératoires pour les prochaines campagnes pédestres avec ces systèmes qui permettent une prospection rapide.

- On peut également observer une relative disparité des distances de transport observées d'une zone d'injection à l'autre, qui est concordante avec les érosions de berges localisées et qui résulte de contextes hydrauliques locaux eux-mêmes spécifiques (resserremments du chenal, position dans la courbure du méandre, etc.).

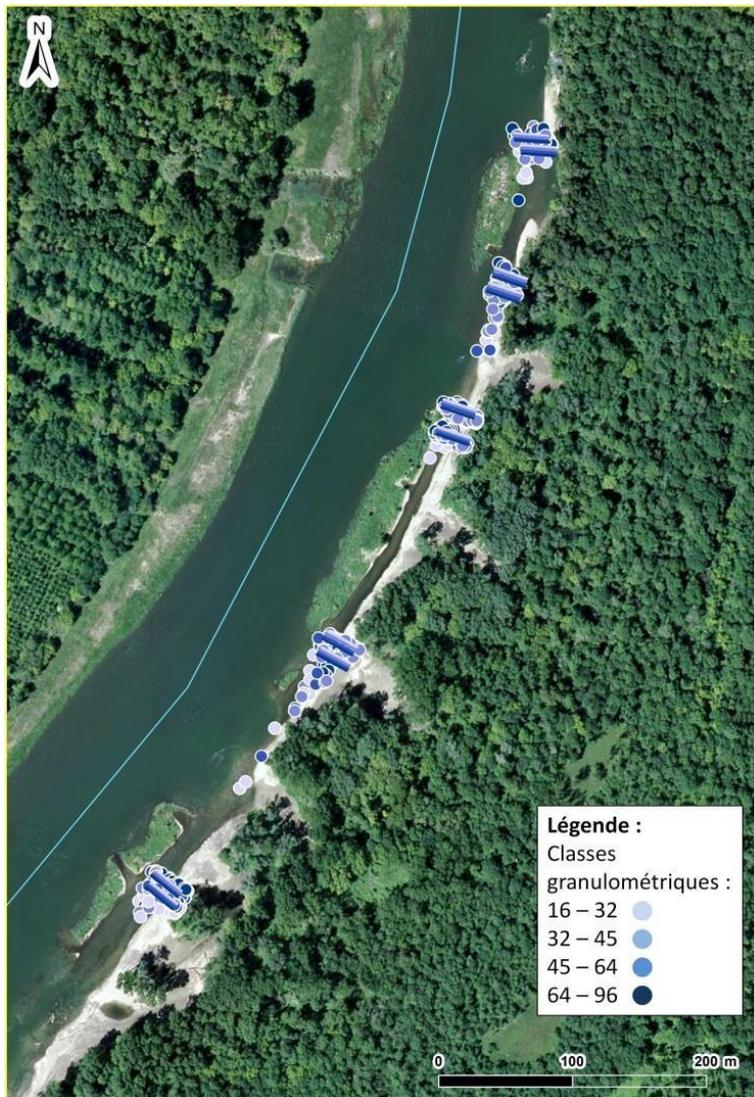


Figure 11. Position des traceurs à la suite du premier suivi de l'île des Graviers.

Un deuxième suivi a été réalisé les 14 et 15 octobre 2020. Il a enregistré des déplacements correspondant à un pic de crue dont le débit a atteint environ 2000 m³/s. Ce suivi réalisé lors d'une journée et demi a mobilisé 3 opérateurs entre 10h et 12h30 du 14 octobre, et 10h et 17h du 15 octobre. Ceux-ci ont utilisé une antenne tractée par deux opérateurs.

Les déplacements mesurés lors de ce deuxième suivi suggèrent que les traceurs n'ont pas enregistré des déplacements d'importance depuis le premier suivi. Seulement 48% des particules retrouvées se sont déplacées de 10 m ou plus, avec un déplacement moyen et maximal de 24 m et 94 m respectivement (Tableau 12).

Tableau 12. Synthèse des métriques descriptives des suivis de traçage sédimentaire opérés à l'Île des Graviers.

Suivi	Tps de prospection	Surface prospectée	Date de fin	Tx de retour	Distance moy. (en m)	Distance max. (en m)
E1	15 hrs	1.8 ha	29/01/2020	66.5%	NA	130
E2	9 hrs	1.8 ha	15/10/2020	24%	14	94

2.7. L'Île des Dames à Donzère

Les lônes de la Grange écrasée et des Dames ont fait l'objet d'un projet de restauration mené par la CNR en janvier 2019. Celui-ci comprend le curage des deux bras secondaires et la réinjection d'un volume de près de 30 000 m³ de matériaux dans le Vieux-Rhône et sur le banc situé immédiatement à l'aval de l'entrée de la lône des Dames en rive droite. Le projet a été achevé avec la remise en eaux des deux lônes. Parmi les objectifs de ce suivi, la redynamisation des lônes et la restauration de leur processus d'autoentretien ont conduit à la définition d'un protocole d'injection et une répartition originale des traceurs. En effet, une partie des traceurs a été injectée dans les deux bras restaurés afin d'évaluer les débits seuil de mise en mouvement et le potentiel d'auto-entretien de la lône. Il s'agit également de suivre son évolution morphologique.

Sous l'égide de la CNR et avec l'appui du laboratoire EVS, près de 1500 traceurs, équi-répartis en 4 classes granulométriques (Tableau 13) ont été injectés en avril 2019 comme suit (Figure 12) :

- 1100 particules dans le chenal principal, réparties le long de 5 profils distants d'environ 200 mètres et dont le plus aval est localisé en amont de l'entrée de la lône de la Grange écrasée,
- et 200 particules par lône, quelques dizaines de mètres à l'aval de chacune des entrées.

Ils ont été déposés à la main sous la surface de l'eau, un à un, afin d'éviter une injection en amas.

Tableau 13. Répartition par classes granulométriques des traceurs injectés à l'Île des Dames.

Classes granulométriques (mm)	16 - 32	32 - 45	45 - 64	64 - 90	Total
Nb de traceurs	374	374	375	376	1499
Part des traceurs	25%	25%	25%	58%	
Fréquences cumulées	0.50	0.70	0.90	1	

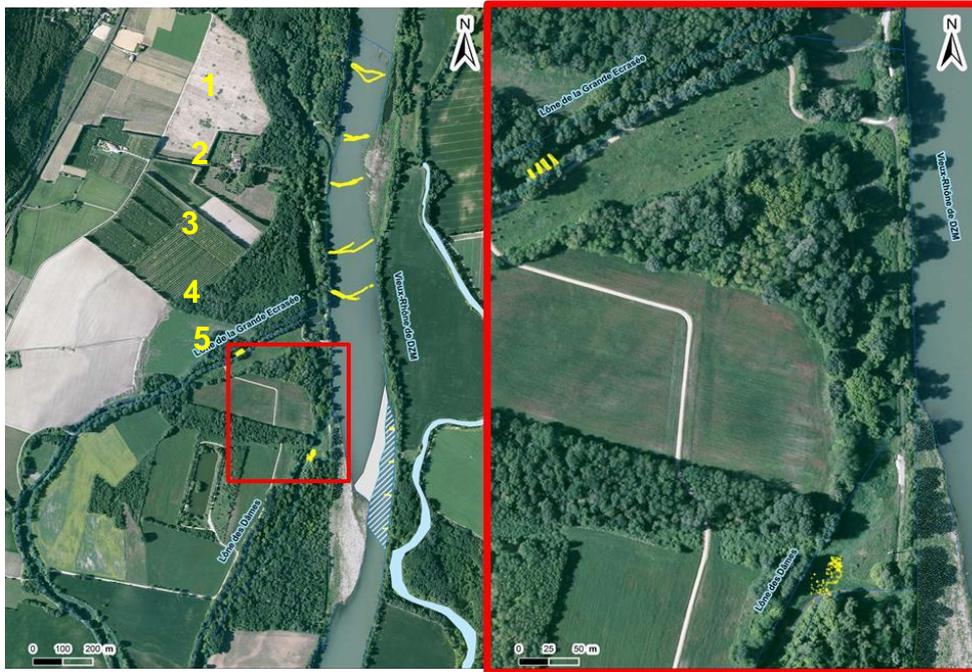


Figure 12. Localisation des injections dans le chenal principal et aux entrées des îlons restaurés de l'île des Dames et de Grange écrasée

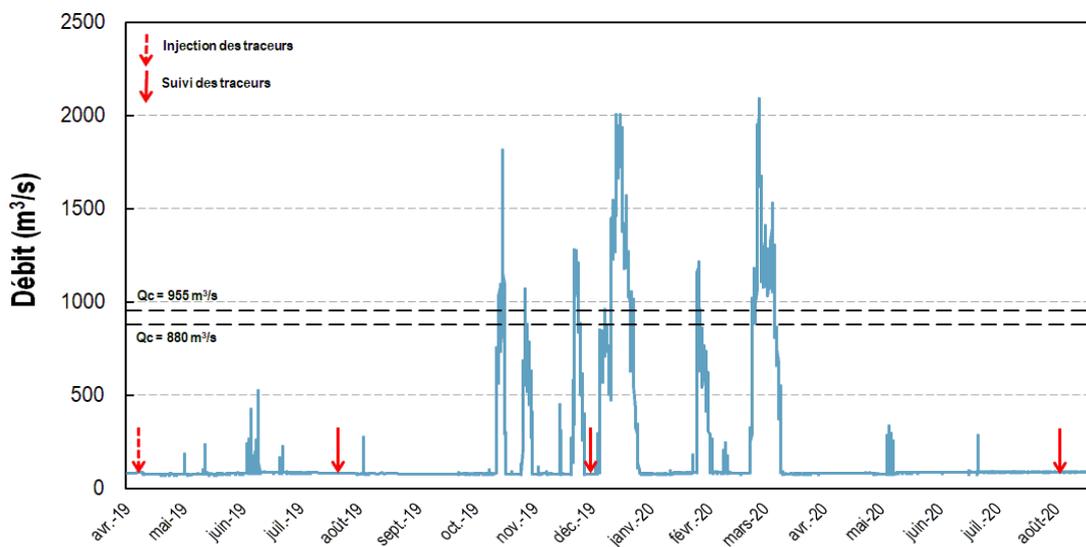


Figure 13. Chronique hydrologique des débits dans le Vieux-Rhône de Donzère et dates des suivis.

Le premier suivi, réalisé après un petit événement hydrologique dont le pic a atteint $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figure 13), fait état d'une absence générale de mouvement (Figure 14). Le second suivi réalisé quant à lui après une série de pics dépassant les Q_c initialement estimés (Tableau 2), fait état d'un transport partiel dans le chenal principal du Rhône. Les valeurs moyennes de distance de transport (au contraire

des maximales) présentent un effet léger de la taille des traceurs (Tableau 14). Mais des effets locaux liés à la géométrie du chenal sont plus marqués.

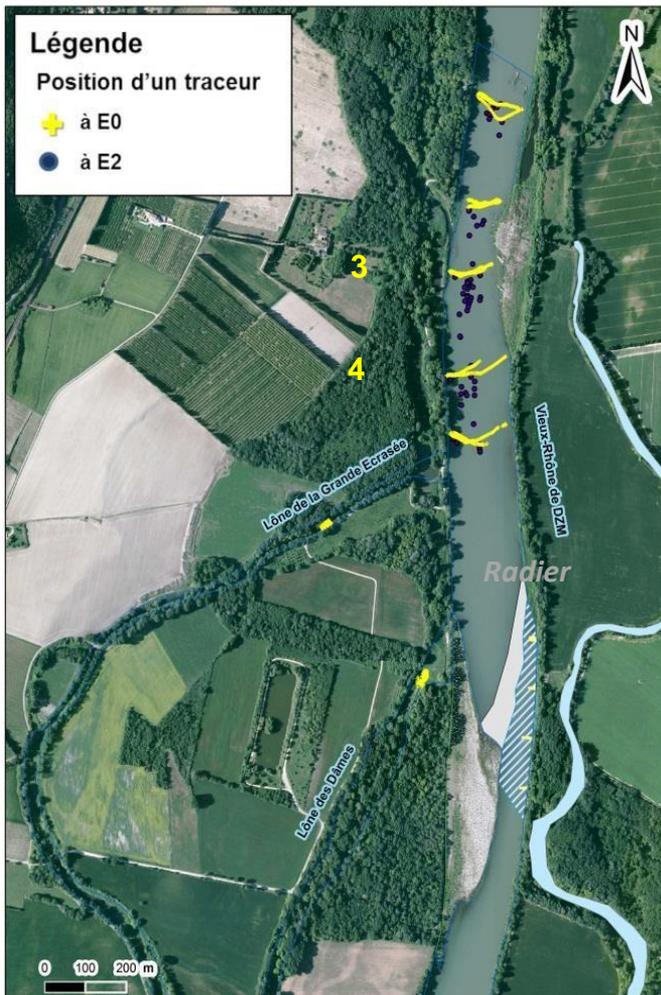


Figure 14. Localisation des traceurs localisés au cours du premier suivi de Donzère dans le secteur de l'île des Dames.

Une campagne de terrain pour un troisième suivi a été réalisée du 18 au 20 août 2020 et a mobilisé 5 opérateurs (2 CNR et 3 EVS), ainsi que 2 embarcations motorisées. Le premier jour de prospection, les opérateurs étaient répartis en deux équipes. Une première équipe a prospecté au droit des profils d'injection à partir d'une embarcation motorisée munie d'une petite antenne circulaire. La seconde, équipée d'une antenne rectangulaire, s'est concentrée sur les particules mobiles à l'aval des profils d'injection. Au cours des deuxième et troisième jours de prospection, nous avons inspecté le radier à l'aval du secteur, une équipe à pied et la seconde à partir d'une embarcation motorisée.

Entre le second et le troisième suivi, trois pics de crue ayant dépassé nos estimations préliminaires du Q_c pour le secteur (Tableau 2; Figure 13) ont été observés. Ce troisième suivi nous a permis de mesurer des déplacements enregistrés au cours d'une période d'activité hydrologique relativement significative (Figure 15). Au total, 195 traceurs ont été localisés dans le vieux Rhône (taux de retour de 19,5 %). Ils ont parcouru des distances moyenne et maximale de 190 et 890 mètres, respectivement.

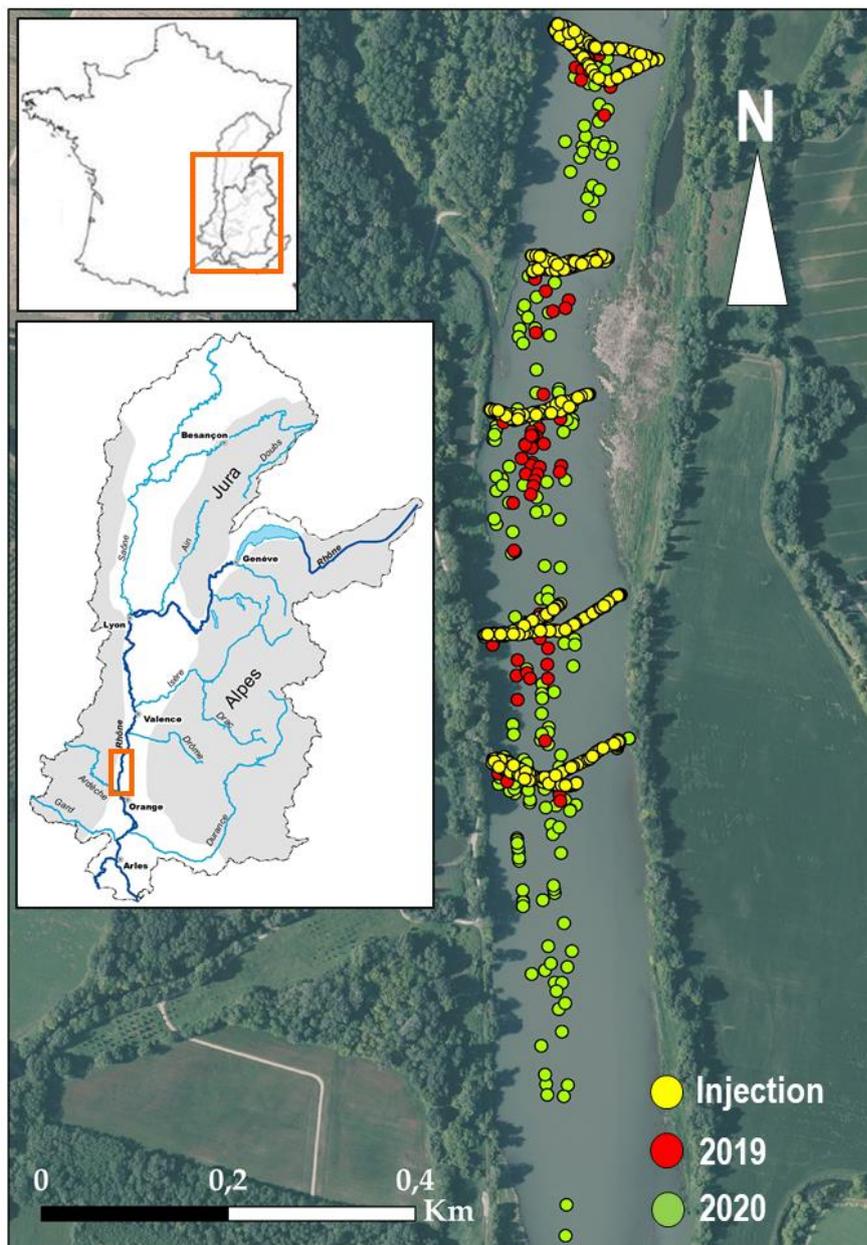


Figure 15. Localisation des traceurs localisés au cours du deuxième et du troisième suivi de Donzère dans le secteur de l'île des Dames.

Tableau 14. Synthèse des métriques descriptives des suivis de traçage sédimentaire opérés au niveau du secteur de l'île des Dames.

Suivi	Tps de prospection	Surface prospectée	Date de fin	Tx de retour	Distance moy. (en m)	Distance max. (en m)
E1	60 hrs	12 ha	07/08/2019	37.6%	NS	NS
E2	10 hrs	12 ha	10/12/2019	15.8%	24	288
E3	12 hrs	12 ha	18/08/2020	19.5%	190	890

3. ANALYSE DES DONNÉES

Dans la section précédente, nous avons résumé les éléments acquis lors des suivis réalisés sur les différents sites équipés. Nous avons ainsi présenté la méthodologie et des informations décrivant le fonctionnement local du fleuve. La base de données ainsi constituée intègre les protocoles et les technologies utilisés, les périodes de temps couvertes, les événements hydrologiques enregistrés et les résultats des suivis de traçage sédimentaire. Bien que celle-ci présente certaines limites liées à la diversité des protocoles et des techniques utilisés, elle permet toutefois un certain nombre d'analyses. Dans la suite de ce rapport, nous proposons cinq axes de travail pour l'analyse de ces données de traçage sédimentaire dans le Rhône :

- une analyse plus approfondie des potentiels effets liés à la taille des traceurs sur les distances de propagation des particules,
- une estimation des débits critiques de mise en mouvement du sédiment du lit du Rhône dans les secteurs d'étude,
- une analyse comparative des diamètres mobilisés par des crues de référence, en s'appuyant sur les travaux issus de l'OSR4,
- une analyse statistique essayant de lier les distances de transport des traceurs avec les conditions hydrauliques locales,
- et finalement, une analyse comparative entre les distances mesurées et les estimations des capacités de transport par charriage réalisées dans le cadre de l'OSR4.

3.1. Analyse des effets de taille

Afin d'analyser les effets de la taille des particules sur la dispersion des traceurs dans le Rhône, nous avons exploré deux types d'informations :

- l'évolution dans le temps des proportions des différentes classes de taille dans l'échantillon des traceurs retrouvés ;
- les distances de transport moyennes des différentes classes de taille, pour chaque site et pour chaque suivi.

Ci-dessous, nous décrivons de façon indépendante les observations obtenues sur chacun des sites. Ces observations sont ensuite analysées ensemble afin d'observer si une tendance générale se dégage à l'échelle du Rhône entre la distance de propagation des particules et la taille des traceurs.

3.1.1. Le Vieux Rhône de Chautagne

La distribution dans le chenal de la taille des traceurs observée lors du premier suivi du RCC de Chautagne se caractérise par une surreprésentation des traceurs plus fins (22-32 μm) et une sous-représentation des particules plus grossières (Figure 16. Droite). Les déplacements ont été faibles entre la date d'injection et la date du premier suivi, et nous interprétons ces différences de représentation entre classes de granulométrie comme étant liées au problème de collision du signal pendant la prospection. L'hypothèse est que les traceurs plus grossiers n'ont pas beaucoup bougé et

que leurs signaux RFID se sont superposés entre eux, réduisant le nombre de traceurs identifiés. Et de fait, lors du deuxième suivi, nous retrouvons des distributions très semblables entre les tailles de traceurs détectés et initialement injectés (Figure 16. Droite), ce qui suggère qu'il n'y a pas de biais de relocalisation des traceurs lié à la taille des particules.

Les distances moyennes parcourues lors du premier suivi ne montrent pas d'effet de la taille des particules (Figure 16. Gauche). Ceci dit, le nombre de traceurs identifiés lors de ce premier suivi était très faible pour les classes granulométriques 64-90 mm (1 traceur) et 90-128 mm (1 traceur), ce qui rend délicat toute analyse statistique. Lors du second suivi réalisé à Chautagne, une certaine tendance est observée dans la relation entre distance parcourue et taille des particules. Les traceurs plus grossiers (90-128 mm) ont été transportés moins loin (en moyenne) que ceux de plus petite taille. Ces observations suggèrent que le charriage a eu un caractère « plus particulaire » pendant cette seconde période hydrologique, avec un très léger effet de taille.

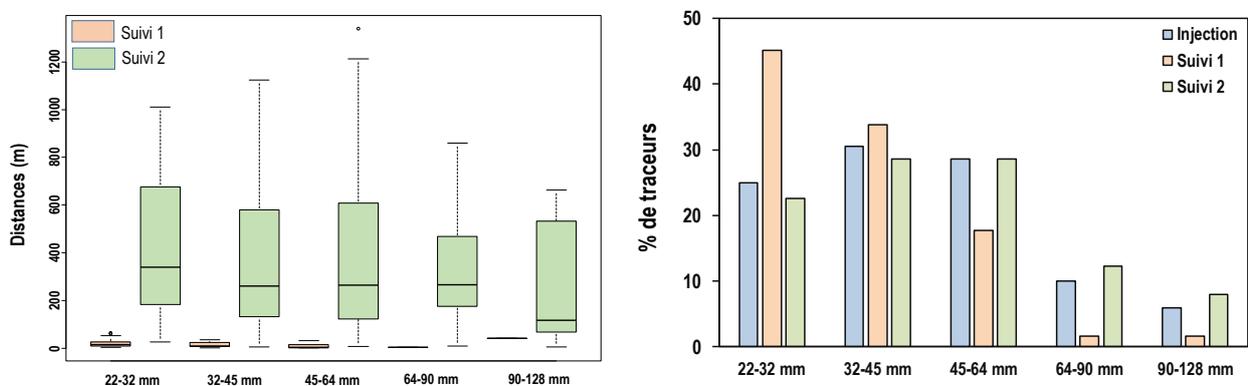


Figure 16. Gauche : Distribution des distances de transport par classe de taille granulométrique dans le RCC de Chautagne pour les deux campagnes de suivi. Droite : Pourcentage de traceurs par classe de taille dans le nuage des traceurs dans le RCC de Chautagne.

3.1.2. Le barrage de Jons et le canal de Miribel

Lors du premier suivi sur ce secteur, nous observons des effets de taille assez nets (Figure 17. Gauche). De même, quand nous comparons la distribution des classes de taille des traceurs retrouvés comparativement à la distribution lors de l'injection, nous observons une légère sous-représentation des particules plus fines. Cela suggère qu'il est probable que des traceurs plus fins n'aient pas été retrouvés car ils étaient situés en-dehors de la zone de prospection. Il est ainsi probable que les distances moyennes parcourues par les particules plus fines soient plus longues que celles que nous avons réellement observées et que les effets de taille sont encore plus marqués.

Dans le cas du deuxième suivi, le nombre des traceurs retrouvés est très faible : 8 traceurs sur les 200 traceurs initialement injectés, et pour la classe de taille la plus petite (32-45 mm), nous n'avons même retrouvé aucun traceur (Figure 17. Droite). Malheureusement, ces données ne nous permettent pas de faire des estimations statistiques robustes.

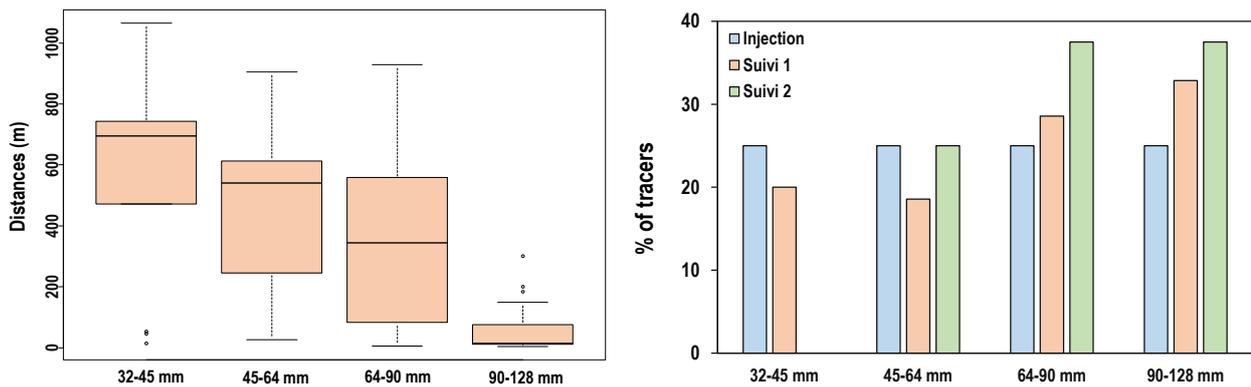


Figure 17. *Gauche* : Distribution des distances de transport par classe de taille granulométrique dans le canal de Miribel pour les deux campagnes de suivi. *Droite* : Pourcentage de traceurs par classe de taille dans le nuage des traceurs dans le canal de Miribel.

3.1.3. La réinjection de la Platière à Péage de Roussillon

Lors de la première période de suivi, nous n’observons pas de grandes différences de déplacements en fonction de la classe de taille (Figure 18. Gauche) et les déplacements enregistrés sont faibles. Ceux-ci peuvent toutefois masquer de potentiels effets de taille. Nous observons d’ailleurs une sous-représentation des tailles les plus petites dans l’échantillon de ce premier suivi par rapport à celles initialement injectées (Figure 18. Droite).

Pour l’analyse des campagnes suivantes, nous avons fusionné leurs observations parce qu’il n’y a pas eu de crues significatives entre le deuxième et le quatrième suivi. Ces trois suivis enregistrent ainsi les déplacements générés au cours d’une même période hydrologique : celle comprenant les crues observées entre le premier et le deuxième suivi. Au cours de cette période, nous n’observons pas de différences dans les distances de déplacement entre les différentes classes de taille (Figure 18. Gauche) et donc pas d’effet significatif de taille. La distribution des classes de tailles dans l’échantillon des traceurs se caractérise cependant par une sous-représentation des particules plus petites par rapport à la distribution des tailles au moment de l’injection (Figure 18. Droite): il semble que les particules plus petites soient allées au delà de la zone prospectée. Il est ainsi possible que les observations présentées sur la Figure 18 (Gauche) soient ainsi biaisées du fait de la perte des traceurs plus petits. Un certain effet de la taille en fonction des distances de propagation est donc probable dans ce secteur. Il faut aussi considérer des effets potentiels liés à la taille des transpondeurs : les traceurs plus petits sont aussi équipés de transpondeurs plus petits qui nécessitent que l’opérateur soit plus proche des particules pour pouvoir les détecter.

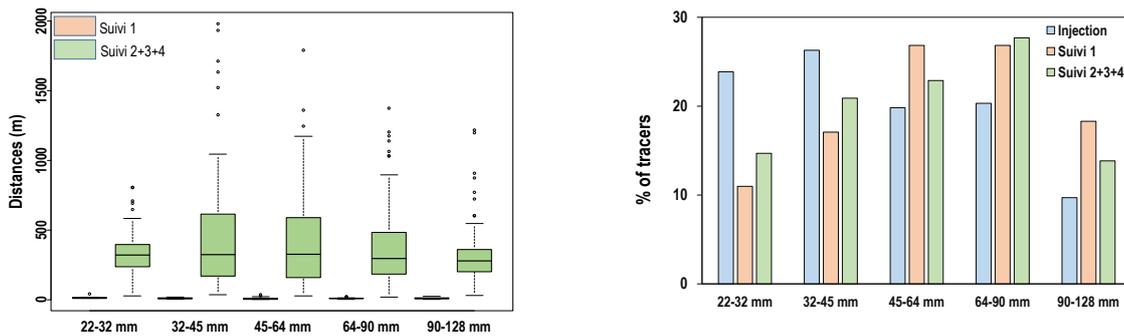


Figure 18. *Gauche* : Distribution des distances de transport par classe de taille granulométrique dans la réinjection de la Platière. *Droite* : Pourcentage de traceurs par classe de taille dans la réinjection de la Platière.

3.1.4. L'île des Gravières à Péage de Roussillon

Lors de la première période étudiée, nous n'observons pas un effet de taille sur les distances mesurées (Figure 19. Gauche). Lors de la deuxième période hydrologique étudiée, nous observons un léger effet de taille : les distances moyennes de déplacement pour les particules de la classe de taille 16-32 mm sont légèrement plus grandes que pour la classe de taille 64-90 mm, mais l'effet est très réduit. Nous observons aussi une sous-représentation des tailles des traceurs plus petits (Figure 19. Droite), ce que pourrait indiquer la perte d'un certain nombre de ces traceurs plus petits et leur départ en dehors de la surface prospectée. Ainsi, les effets de taille pourraient être un peu plus marqués que ceux que nous avons enregistrés.

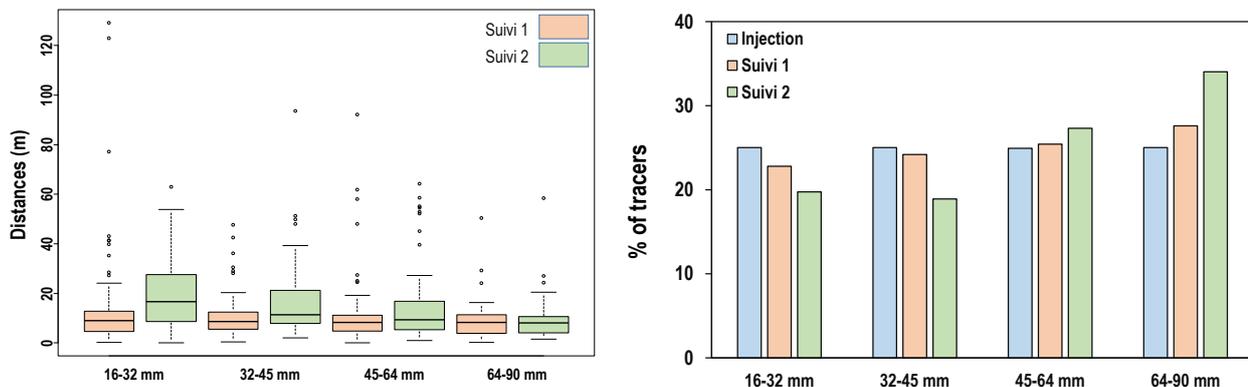


Figure 19. *Gauche* : Distribution des distances de transport par classe de taille granulométrique dans la réinjection de la Platière. *Droite* : Pourcentage de traceurs par classe de taille dans la réinjection de la Platière.

3.1.5. L'île des Dames à Donzère

Lors de la première période hydrologique étudiée, nous n'observons pas de différences liées à la classe granulométrique dans les déplacements moyens des traceurs (Figure 20. Gauche). Le déplacement global de l'ensemble du nuage de traceurs a en outre été très faible. De même, lors des deuxième et

troisième périodes analysées, nous n’observons pas non-plus de différences de déplacements liées aux classes de taille. A nouveau, la distribution des tailles dans le nuage de traceurs lors des différents suivis montre une certaine sous-représentation des particules plus petites après tous les suivis (Figure 20. Droite). Comme nous l’avons indiqué pour les autres secteurs, il est possible qu’un certain nombre des traceurs plus petits soient allés au-delà de la zone prospectée. Dans ce cas-là, les effets des tailles pourraient être un peu plus importants que ce que nous avons pu enregistrer lors de notre suivi.

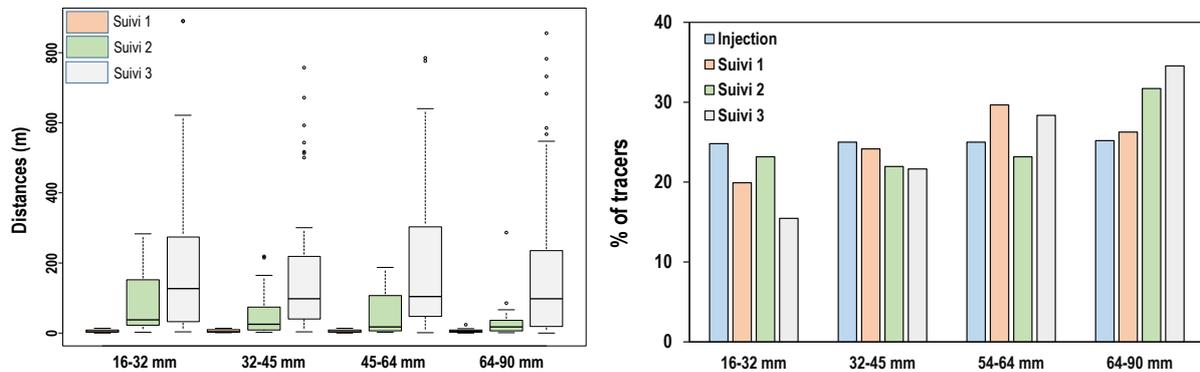


Figure 20. *Gauche* : Distribution des distances de transport par classe de taille granulométrique dans l’île des Dames à Donzère. *Droite* : Pourcentage de traceurs par classe de taille dans l’île des Dames à Donzère.

3.1.6. Synthèse

Les données de traçage du Rhône, discutées dans leur ensemble, soulignent un comportement du transport des traceurs par charriage « en vrac » lors de la plupart des suivis effectués : en effet, d’une façon générale, nous n’observons aucun effet de taille marqué. Seul le premier suivi à Jons montre un effet de taille très net. Il s’agit d’un suivi pour lequel l’intensité des déplacements enregistrés par le panache de traceurs a été très important (~400-1000 m). Ce suivi mis à part, il semblerait que lors des premiers déplacements, les particules se déplacent ensemble et sans qu’on observe des différences entre classes de taille. Mais quand l’intensité des évènements hydrologiques augmente et que les déplacements deviennent plus importants (comme à Jons), le transport par charriage montre alors un comportement plus « particulière ». Cependant, il ne faut pas négliger les incertitudes liées aux biais expérimentaux, associées à toutes mesures de transport solide sur le terrain. À ce propos, dans plusieurs des suivis effectués une perte préférentielle des particules les plus fines est observée ; il est ainsi possible que les effets de taille soient en général plus importants que ceux que nous avons enregistrés. À cet égard, il faut aussi considérer la différence dans la taille des transpondeurs équipés (plus petits dans les particules plus fines) qui peut impliquer des distances de détections plus courtes.

Dans le cadre de l’étude des effets de la taille des particules sur les distances de propagation, Church et Hassan (1992) ont observé que le rapport « *Distance moyenne pour chaque classe de taille/Distance pour la classe médiane* » (L^*) est en général corrélé avec le rapport « *Classe de taille/Taille médiane du lit* » (D^*). L’intérêt de cette approche est d’isoler les effets de taille d’autres effets, par exemple liés à l’intensité de la crue, et qui peuvent dans certains cas masquer les variations entre les différentes classes de taille. À partir d’une large base des données de terrain, ces auteurs ont trouvé une relation du type :

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

Éq. 1

Ce même rapport a été ensuite confirmé par d'autres travaux de laboratoire (par ex. Wilcock, 1997) comme de terrain (Ferguson et Hoey, 2002). À cet égard, Milan (2013), et Vázquez-Tarrío et al. (2019a) dans une méta-analyse, ont trouvé de petites différences avec l'éq. 1, mais la forme générale de la relation entre distance de transport et taille de particule proposée par Church et Hassan (1992) est confirmée (Figure 21).

Ainsi, nous avons réalisé une analyse similaire avec les données du Rhône (Figure 21). Nous observons que les données du Rhône suivent globalement la courbe décrite par Church et Hassan (1992). Notre analyse montre néanmoins que le lien entre la distance de transport dans le Rhône et la taille des particules est plus faible que celle présentée par Church et Hassan (1992) et plus proche de celles observées par Milan (2013) ou Vázquez-Tarrío et al. (2019a). Toutefois, deux points peuvent être discutés:

- Church et Hassan (1992) se sont appuyés sur des données pour lesquelles ils étaient sûrs d'analyser les premiers déplacements des particules. Cela n'est pas le cas de Milan (2013) ou de Vázquez-Tarrío et al (2019a), ni de la présente analyse sur le Rhône ; alors, nous pouvons hypothétiser que les effets de taille se réduisent une fois que les particules commencent à interagir verticalement avec le sédiment du lit ;
- par ailleurs, nous avons constaté une sous-représentation des tailles les plus petites au sein des traceurs retrouvés dans certains secteurs (canal de Miribel, Péage), ce qui peut influencer les distances de transport.

En fait, les données du Rhône ne s'éloignent pas beaucoup de la relation initialement proposée par Church et Hassan (1992). Il est ainsi possible que la relation trouvée ici (et prise en compte dans la loi de régression de la figure 21) peut être utilisée comme une loi spécifique au Rhône (qu'on appellera « loi Rhône ») comme une première approche pour modéliser le tri granulométrique dans les travaux de recharge sédimentaire entrepris sur le Rhône.

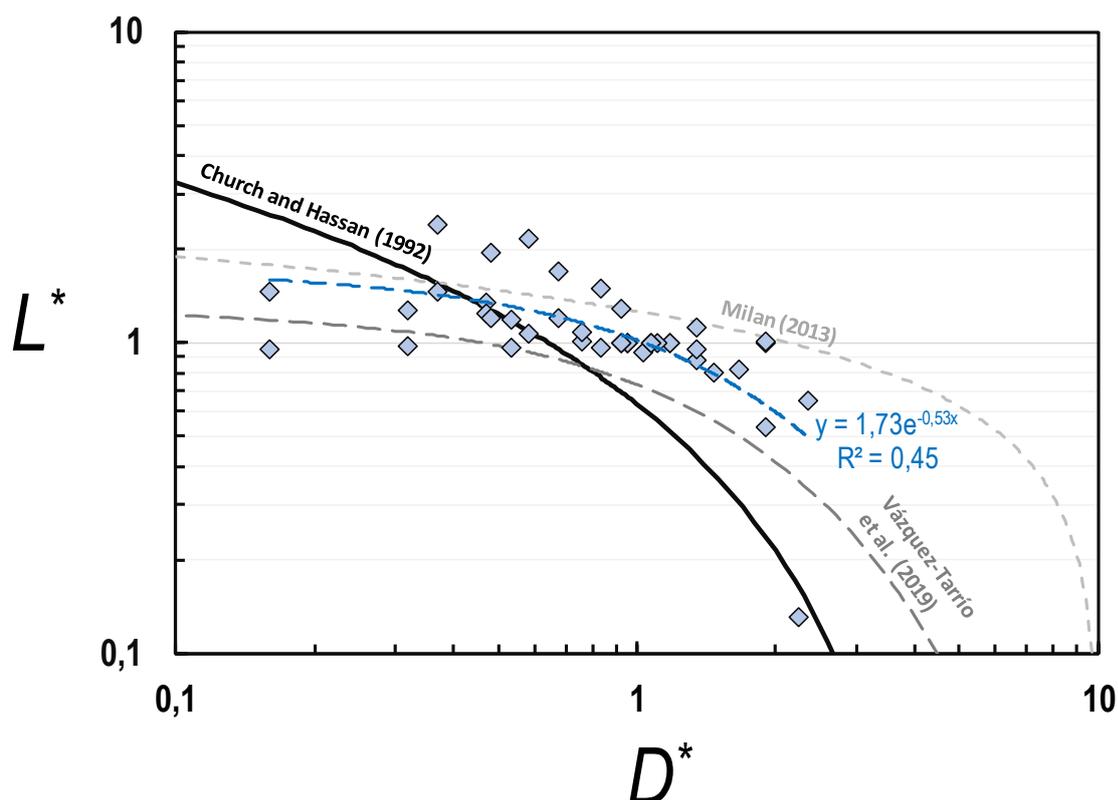


Figure 21. Axe-y : Rapport entre la distance moyenne de déplacement pour chaque classe de taille et la distance moyenne de déplacement pour la classe de taille correspondant au D50, pour les différents suivis dans le Rhône. Axe-x : Rapport entre le diamètre moyen des particules pour chaque classe de taille et le diamètre médian du lit sur le Rhône.

3.2. Estimation des débits critiques

Nous avons estimé les débits critiques de mise en mouvement pour les différents sites d'étude à partir des modèles de Schoklistch et Bathurst (Tableau 2). Ces estimations nous ont permis d'avoir une première idée des débits critiques permettant de mieux planifier les campagnes de prospection. Les observations de terrain nous fournissent également une information qui peut potentiellement être utilisée pour affiner ces estimations. Nous avons ainsi exploité les données de traçage sédimentaire disponibles jusqu'à présent pour le Rhône afin d'améliorer les connaissances relatives aux débits critiques de mise en mouvement des sédiments du lit, dans les différents secteurs étudiés.

Pour chacun des sites d'étude, nous avons une observation des pics de crue de différentes intensités et des déplacements plus ou moins importants des traceurs. À partir de ce type d'information, nous avons essayé d'évaluer les débits critiques de mise en mouvement en suivant la suivante démarche :

- 1) Pour chaque site d'étude, nous avons regardé quel était le débit le plus élevé pour lequel nous n'observons pas de déplacement des traceurs ; c'est à dire, la valeur du dernier pic de crue, depuis le moment d'injection, sans déplacement identifié de l'échantillon des traceurs.

- 2) Nous avons regardé ensuite quel était le débit le plus bas pour lequel nous enregistrons, pour la première fois, un déplacement significatif des traceurs ; c'est-à-dire la valeur la plus basse de la série des pics de crue observée entre le moment de l'injection et le premier déplacement des traceurs.
- 3) À partir de ces deux valeurs, nous déterminons une fourchette de valeurs possibles pour le débit critique de mise en mouvement pour chacun des sites d'étude.

Evidemment, en fonction de la résolution temporelle des données et du nombre plus ou moins réduit d'événements de crue observés entre l'injection et le premier suivi (et entre les différents suivis), la fourchette des valeurs possibles sera plus ou moins large. Dans le tableau suivant, nous résumons nos observations :

Tableau 15. Synthèse des estimations des débits critiques dans les différents secteurs d'étude.

Site	Débit max. sans déplacement (m ³ /s)	Débit min. avec déplacement (m ³ /s)	Fourchette débit critique (m ³ /s)	Débit critique estimé Shields = 0.02	Débit critique estimé Shields = 0.03	Débit critique estimé Shields = 0.045	Débit critique estimé Shields = 0.06
Chautagne	260	1933	260-1933	1280	1810	2690	3560
Jons / Miribel	<1021	1021	0-1021	710	1160	2010	2970
Neyron	<1021	1021	0-1021	740	1040	1540	2040
Péage Reinj. Platières	500	1712	500-1712	1230	1780	2710	3660
Péage Marges	900	1470	900-1470	920	1310	1970	2630
Donzère	350	1800	300-1800	180	550	2200	6440

Afin d'aller plus loin dans les analyses et l'exploitation des données, nous avons essayé d'établir des critères ou valeurs pour les paramètres hydrauliques de mise en mouvement qui soient généralisables à d'autres tronçons du Rhône et réduisent la dépendance aux données du terrain. Pour arriver à cela, la chaîne d'analyse que nous avons suivie repose sur les étapes suivantes :

- 1) À partir d'une estimation des forces tractrices pour les différents débits, issue du travail de modélisation hydrosédimentaire réalisé dans le cadre de l'OSR4, nous avons d'abord établi une courbe « débit vs forces tractrices » pour chaque site d'étude, au niveau des points d'injection des traceurs.

- 2) Ensuite, nous avons appliqué différents critères pour le paramètre de Shields (0.02, 0.03, 0.045, etc.) et nous avons estimé les débits associés. A noter que les valeurs des paramètres de Shields ont été estimées à partir de la taille médiane de traceurs utilisant la formule suivante :

$$Shields = \frac{\tau}{1650 \cdot g \cdot D_{trac}} \quad \text{Éq. 2}$$

Où τ est la valeur des forces tractrices (moyennées dans la section) extraites des estimations de l'OSR4, g l'accélération de la gravité et D_{trac} la taille médiane des traceurs.

- 3) Enfin, nous avons comparé les débits ainsi définis avec la fourchette des valeurs dérivées des données de traçage présentées plus haut, et nous avons essayé de définir la valeur du paramètre de Shields qui semble la plus adaptée aux sites d'étude.

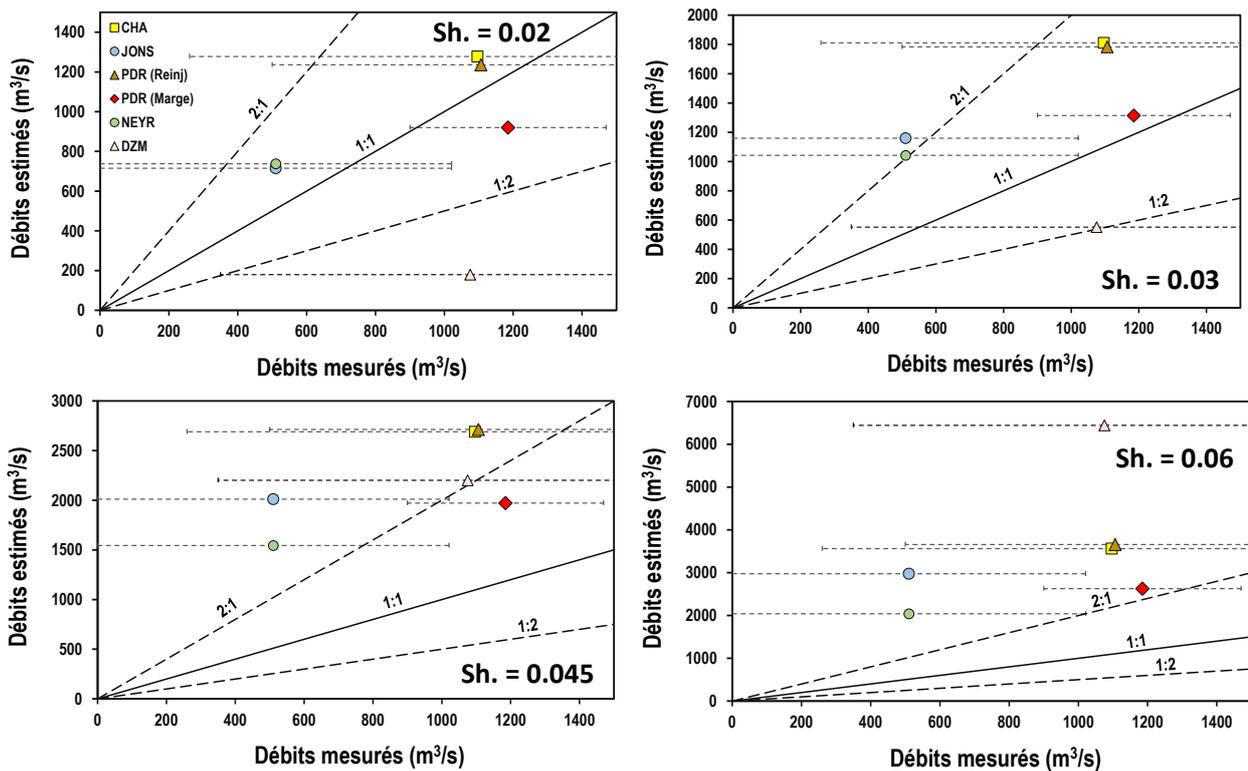


Figure 22. Comparaison entre débits de mise en mouvement mesurés (observés sur le terrain) et débits de mise en mouvement estimés pour différentes valeurs du paramètre de Shields critique pour les secteurs étudiés du Rhône.

À partir de cette approche, nous observons qu'un paramètre de Shields égal à 0.03 nous donne des valeurs de débits critiques plus « centrées » autour des fourchettes de valeurs possibles définies à partir des observations du terrain (Figure 22). En fait, une valeur du Shields égale à 0.02 donne des valeurs acceptables sur plusieurs des sites, mais les valeurs pour le site de Donzère s'en éloignent un

peu. Par contre, des valeurs de Shields supérieures (0.045, 0.06) donnent des débits critiques très élevés qui ne correspondent pas aux observations de terrain. La valeur de 0.03 semble être cohérente avec les valeurs du paramètre de Shields classiquement utilisées dans la littérature pour des rivières à galets. À ce stade, il faut préciser que ces estimations s'appuient sur des observations de terrain de traceurs déposés à la surface du lit. Il est important néanmoins de souligner qu'au fur et à mesure que les traceurs vont se déplacer et s'intégrer à la couche de surface du lit, les débits critiques de mise en mouvement peuvent s'accroître. Néanmoins, vu l'état pavé du lit du Rhône dans certains RCC, il est aussi possible que les particules injectées transiteront à la surface du lit sans trop d'interaction verticale avec la couche de surface (situation de *bypass* sédimentaire).

3.3. Analyse de la compétence de l'écoulement

Le débit critique de mise en mouvement, utilisé en hydraulique fluviale, est complémentaire de la notion de compétence, utilisée fréquemment en géomorphologie et sédimentologie fluviale. La compétence fait référence à la taille maximale de particule qu'un certain débit ou événement de crue est capable de mobiliser. Pour compléter l'analyse, nous avons ainsi étudiée la compétence et calculé ainsi la taille des particules mobiles, en lien avec l'analyse des débits critiques présentée dans la section précédente. Ainsi, pour chacun des sites d'étude (et chaque période hydrologique analysée) nous avons estimé la taille maximale mobilisée avec la formule suivante :

$$D_{mob} = \frac{\tau}{Shields \cdot g \cdot 1650} \quad \text{Éq. 3}$$

où τ sont les contraintes hydrauliques au pic de crue de la période hydrologique considérée, extraites des estimations résultant du travail de modélisation hydrosédimentaire réalisé dans le cadre d'OSR4. Nous avons utilisé un paramètre de Shields égal à 0.03, en s'appuyant sur les résultats présentés dans la section précédente.

Une fois ces estimations faites, nous avons comparé les valeurs estimées avec la taille maximale des traceurs mobiles identifiés sur le terrain. A ce stade, cette comparaison ne donne pas de résultats satisfaisants (Figure 23) : en général, nous estimons des tailles de particule mobile plus faibles que celles que l'on a mesurées sur le terrain lors du traçage des particules. C'est particulièrement remarquable sur le secteur de Donzère, où les estimations des tailles mobiles sont très faibles par rapport aux observations sur le terrain. C'est aussi le cas du premier suivi réalisé lors de la réinjection de Chautagne et du premier suivi effectué lors de la réinjection de sédiment de la Platière à Péage de Roussillon. Dans ces deux cas, les traceurs ont été déployés sur un point de recharge sédimentaire ce qui peut avoir une certaine influence de la géométrie de la réinjection et de la potentielle position de départ des particules sur des facies d'écoulement.

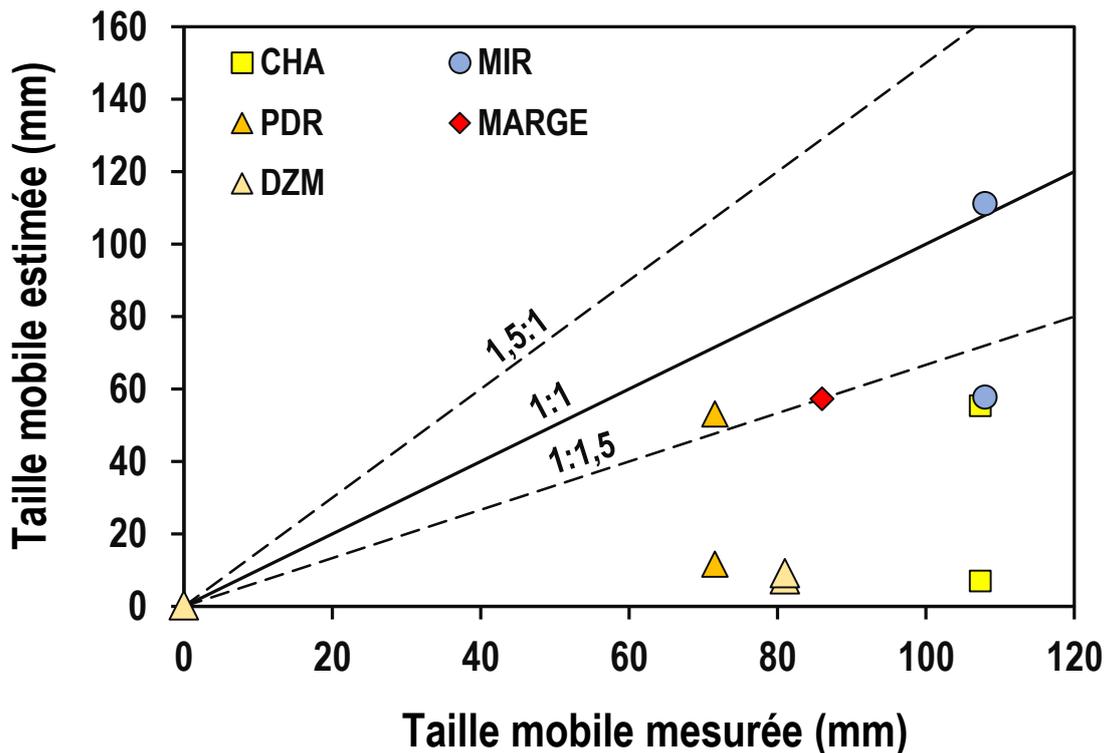


Figure 23. Comparaison entre la taille mobile estimée et celle mesurée sur le terrain, pour chaque site d'étude et chaque période hydrologique étudiés. Note : taille mobile estimée à partir de l'éq. 3 utilisant les forces tractives moyennées dans la section.

Pour aller plus loin, nous avons répété la comparaison, mais en utilisant cette fois les forces tractrices maximales de la section, au lieu des contraintes moyennées dans la section (Figure 24). Cette fois-ci, les estimations des diamètres des particules mobiles sont plus importantes, mais il y a toujours une forte dispersion des données et une sous-estimation des valeurs dans le cas de Donzère, sans explication évidente pour cette déviation. Par contre, nous pouvons avancer plusieurs hypothèses explicatives de l'écart observé aux autres points. Par exemple, dans le cas du second suivi opéré à Péage de Roussillon, nous estimons une taille mobile d'à peu près 180 mm, tandis que la taille maximale de traceur mobile appartient à la classe 64-90 mm, classe la plus grossières dans l'échantillon des traceurs. Il peut donc y avoir un biais dans l'observation de terrain. C'est une situation similaire dans le cas du suivi 2 à Jons. Dans le cas du suivi à l'île des Gravier, nous surestimons aussi la taille des particules mobiles mais les traceurs ont été déployés sur les marges. Ce n'est donc pas judicieux de considérer les contraintes hydrauliques maximales dans la section. Finalement, dans le cas du premier suivi à Chautagne il y a une influence potentielle de la géométrie de la recharge sédimentaire.

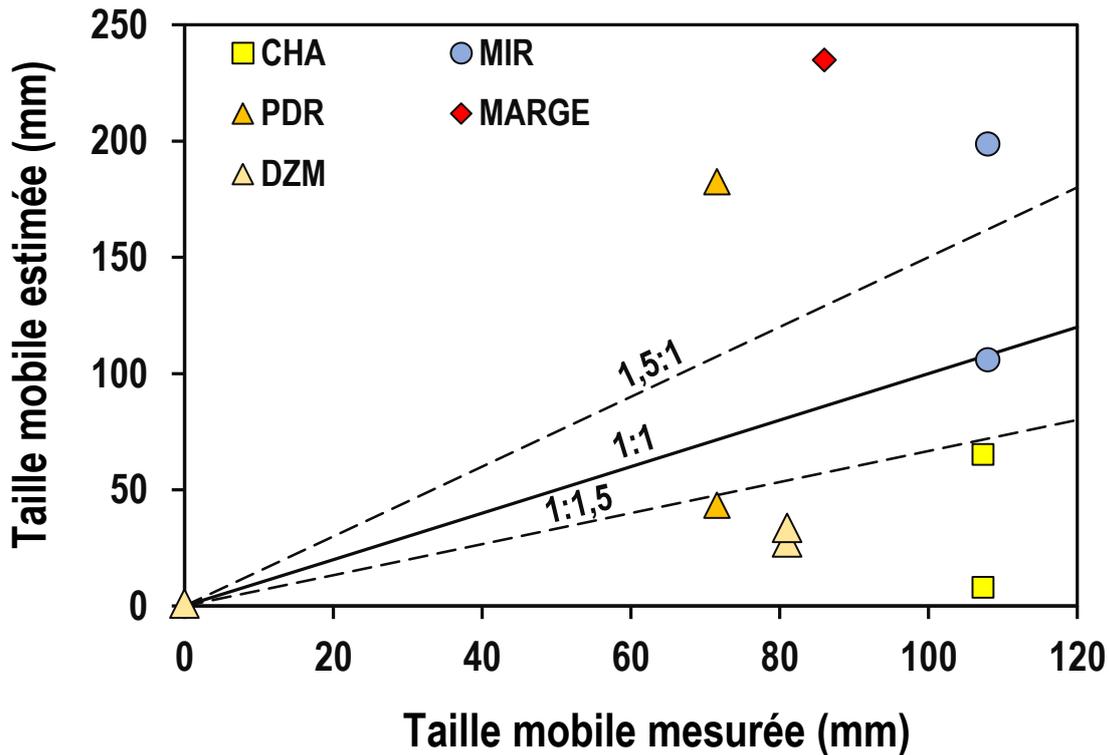


Figure 24. Comparaison entre la taille mobile estimée et celle mesurée sur le terrain, pour chaque site d'étude et chaque période hydrologique étudié. Note : taille mobile estimée à partir de l'éq. 3 utilisant les forces tractrices maximales dans la section.

En résumé, les données de traçage ne permettent pas de faire une évaluation simple et directe de la compétence de l'écoulement et de la taille des particules mobiles sur les sites d'étude, en raison du caractère local des forces hydrauliques qui mettent les particules en mouvement et la forte variabilité spatiale des conditions hydrauliques entre les différents secteurs et modes opératoires pour la remobilisation des sédiments. Il faut souligner aussi que dans le modèle utilisé ici (éq. 3), nous faisons l'hypothèse d'une relation linéaire entre force tractrice et taille des particules mobiles. Cela implique un important effet de la masse de la particule pour le début de charriage (*size-selective*) et néglige une longue tradition d'études théoriques, expérimentales et de terrain qui suggère qu'il n'y a pas une relation linéaire entre compétences et forces tractrices mais plutôt une loi de puissance (« *équations de masquage* ») liant tailles de particule mobile et contraintes hydrauliques (Recking, 2016) :

$$\frac{D_{mob}}{D_{ref}} = \left(\frac{\tau}{\tau_c} \right)^\alpha \quad \text{Éq. 4}$$

où D_{mob} est la taille des particules mobiles, D_{ref} une taille caractéristique du sédiment du lit (normalement, la taille médiane (D_{50}) ou bien le percentile 84 (D_{84}) de la distribution granulométrique du lit), τ sont les forces tractrices au pic de crue et τ_c sont les forces tractrices critiques de mise en mouvement de D_{ref} .

Nous avons utilisé ce type de relation (éq. 4) afin de mieux calibrer un modèle empirique pour estimer la taille de particule mobile sur les sites d'étude. Pour cette analyse, nous avons exclu les sites d'île des graviers à Péage de Roussillon, puisque les traceurs ont été déployés sur la marge et non dans le chenal

principal, ce qui introduit une variabilité supplémentaire qu'on ne peut pas corriger. Quand nous appliquons le modèle de l'équation 4 aux données de traçage disponibles, nous retrouvons une relation statistiquement significative ($R^2 = 0.61$; p-valeur < 0.05) entre tailles mobiles et forces tractrices (moyennées dans la section) (Figure 25), et le coefficient de détermination augmente ($R^2 = 0.87$; p-valeur = 0.05) si on exclut le premier suivi à Chautagne (potentiellement influencé par la géométrie de la zone de recharge) et le deuxième suivi à Péage de Roussillon où la taille des traceurs mobiles était probablement supérieure à la taille maximale des particules représentée dans l'échantillon des traceurs.

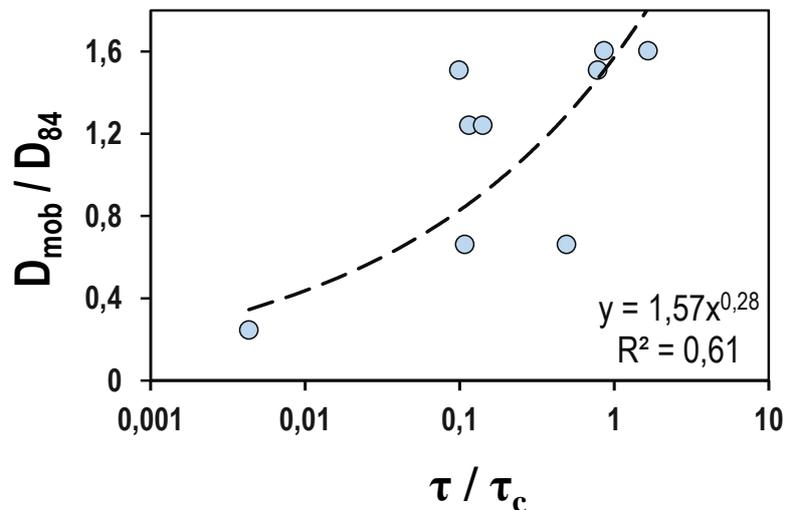


Figure 25. Application de l'éq. de masquage aux données du Rhône.

Cette loi de régression peut potentiellement être utilisée comme modèle semi-empirique ou comme première approche afin d'estimer la taille des particules mobiles dans le chenal principal du Rhône. Pour proposer une première validation de ce modèle, nous avons utilisé une approche de validation croisée de type « *jackknife* » : nous excluons successivement chaque point de l'analyse de régression, répétons la corrélation, appliquons ensuite la loi de régression sur le point exclu et comparons la valeur prédite avec la valeur mesurée. Nous avons répété cette démarche avec tous les points et nous avons obtenu des correspondances assez bonnes entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées (Figure 26).

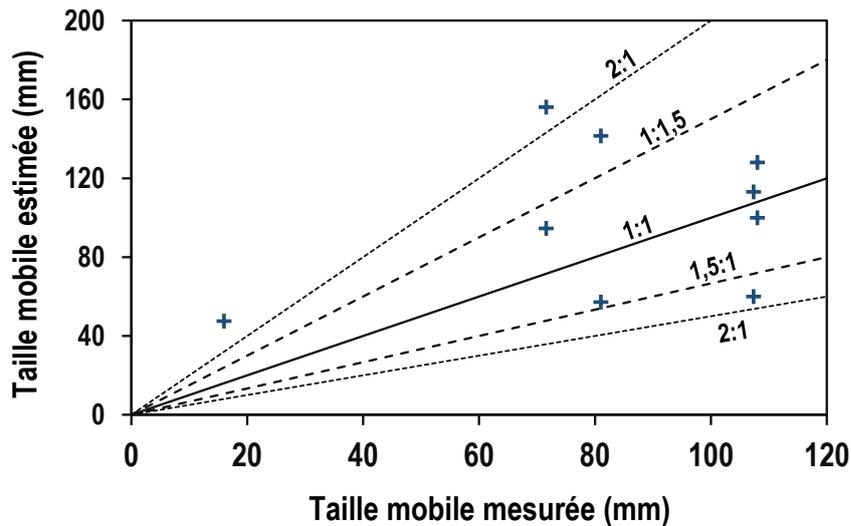


Figure 26. Résultats du test de validation « jackknife » sur la loi de régression présentée en figure 25.

3.4. Contrôles hydrauliques sur les distances de transport

L'intensité de la crue contrôle les distances de propagation du sédiment dans les rivières à galets. Afin d'explorer le lien entre distance de propagation et débit liquide à partir des données disponibles pour le Rhône, nous avons d'abord analysé le lien entre les distances moyennes de propagation des traceurs et la puissance hydraulique non dimensionnelle (telle que définie par Eaton et Church, 2011) au pic de crue. La puissance hydraulique non dimensionnelle (ω^*) représente la puissance hydraulique « classique », normalisée par le poids submergé de la particule :

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

où S est la pente, Q le débit au pic de crue, B la largeur du chenal et D_{50} la taille médiane du sédiment du lit. Le choix de ce paramètre se justifie par 3 raisons : 1) des travaux expérimentaux *ex situ* (Lajeneusse et al., 2010) et *in situ* (Phillips et al., 2013) ont montré qu'en normalisant le forcing hydraulique par le poids de la particule, on observe des patrons persistants de covariation entre distances et débits ; 2) une méta-analyse précédente a montré que l'utilisation de ce paramètre réduit l'écart dans les données de terrain disponibles dans la littérature (Vázquez-Tarrío et al., 2019a) ; et 3) s'estimant directement à partir du débit, la puissance hydraulique est un paramètre plus facile à calculer que d'autres métriques hydrauliques comme par exemple les forces tractrices.

En fait, nous constatons une relation statistiquement modérée ($R^2 = 0.27$; p -valeur < 0.05) entre les distances moyennes de propagation sur le Rhône et ce paramètre (Figure 27), estimé au pic de crue. Quand nous mettons ces résultats en relation avec les données tirées de la littérature et présentées dans une méta-analyse récente (Vázquez-Tarrío et al., 2019a), nous observons que le Rhône se situe entre deux types morphologiques bien identifiés, celui correspondant aux alternances seuil-mouille et le second aux chenaux à lit plat (Figure 28).

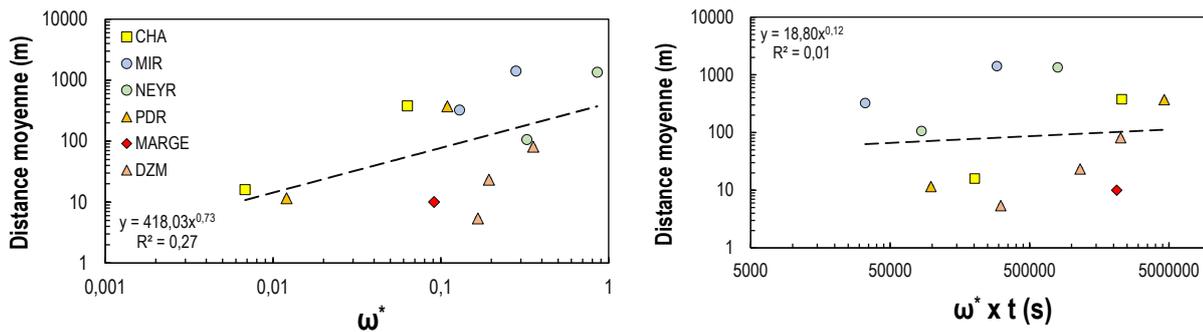


Figure 27. *Gauche* : rapport entre distances moyennes de propagation des traceurs et puissance hydraulique non dimensionnelle. *Droite* : rapport entre distances moyennes de propagation des traceurs et puissance hydraulique non dimensionnelle, pondérée par la durée de la période hydrologique considérée.

En outre, il y a des raisons théoriques et expérimentales (Lajeneusse et al., 2010 ; Roseberry et al., 2012; Phillips et al., 2013 ; Phillips and Jerolmack, 2014) pour imaginer que les distances de propagation des traceurs ne sont pas seulement contrôlées par le pic de crue mais aussi par la durée de la crue, ou plutôt de dépassement du débit d'entraînement. Ainsi, les distances de transport des particules doivent également être corrélées avec le cumul d'excédent de puissance fluviale, plutôt que seulement avec le débit de pointe (comme dans la figure 27 de gauche). C'est pourquoi, nous avons multiplié la puissance non dimensionnelle par la durée de chaque période hydrologique (Figure 27 droite). Nous observons cependant une corrélation encore plus faible qu'avec la puissance hydraulique calculée au pic de crue. Cela semble suggérer que le pic de crue est bien le contrôle majeur des distances de propagation des particules sur le Rhône.

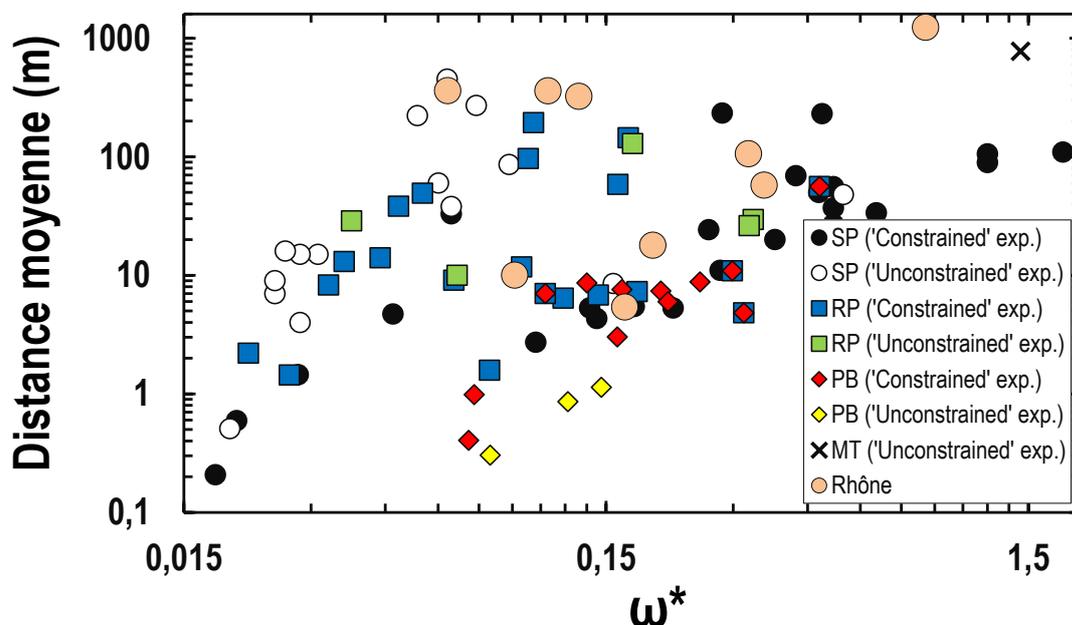


Figure 28. Comparaison du jeu de données du Rhône avec un ensemble de données de traçage rassemblées par Vázquez-Tarrío et al. (2019a) dans le cadre d'une méta-analyse. SP : Lit en escaliers (*step-pool* en anglais). RP : lit avec alternances seuil-moille (*riffle-pool* en anglais). PB : Rivières à lit plat (*plane-bed* en anglais). MT : Rivières à chenal multiple (*multi-thread* en anglais).

En réalité, la nature des contrôles qui s'exercent sur les distances de déplacement des traceurs est assez complexe et dépend d'un éventail assez large de facteurs et de conditions. Bien sûr, à l'échelle du site, c'est le contrôle hydraulique (pic de crue + durée) qui va déterminer les distances parcourues par les particules. Mais la façon dont ces distances vont être corrélées et varier avec l'hydraulique va être déterminée par tout une série d'autres paramètres, liés à la morphologie du chenal (taille du chenal, macro-formes, rugosité du lit), et qui vont faire que la relation entre hydraulique et distance est spécifique à chaque site. À cet égard, Vázquez-Tarrío et Batalla (2019) ont réalisé une analyse statistique multivariée sur une série de données de traçage issue de 9 rivières observées de la littérature. Ils ont trouvé qu'un modèle tel que présenté ci-après prédisait d'une façon robuste les distances de propagation des particules (L):

$$L = A \cdot B^\alpha \cdot D_{84}^\beta \cdot \left(\frac{D_{trac}}{D_{84}}\right)^\gamma \cdot t^\varepsilon \cdot \omega_c^{*\varphi} \cdot \left(\frac{Q}{Q_c}\right)^\delta \quad \text{Éq. 6}$$

où B est la largeur du chenal, D_{84} le percentile 84 de la distribution granulométrique de surface, D_{trac} la taille de traceur, t la durée du période hydrologique, ω_c la puissance hydraulique non dimensionnelle estimée pour le débit critique, Q le débit au pic de crue pour la période hydrologique considérée, Q_c le débit critique, A est le coefficient d'interception et α , β , γ , ε , φ et δ sont des exposants empiriques. Nous avons appliqué la démarche à partir du jeu de données du Rhône, arrivant au calage du modèle de régression multiple suivant :

$$L = e^{30.53} \cdot B^{-2.78} \cdot D_{84}^{5.32} \cdot t^{1.73} \cdot \omega_c^{*10.02} \cdot \left(\frac{Q}{Q_c}\right)^{0.09} \cdot \left(\frac{D_{trac}}{D_{84}}\right)^{-0.03} \quad \text{Éq. 7}$$

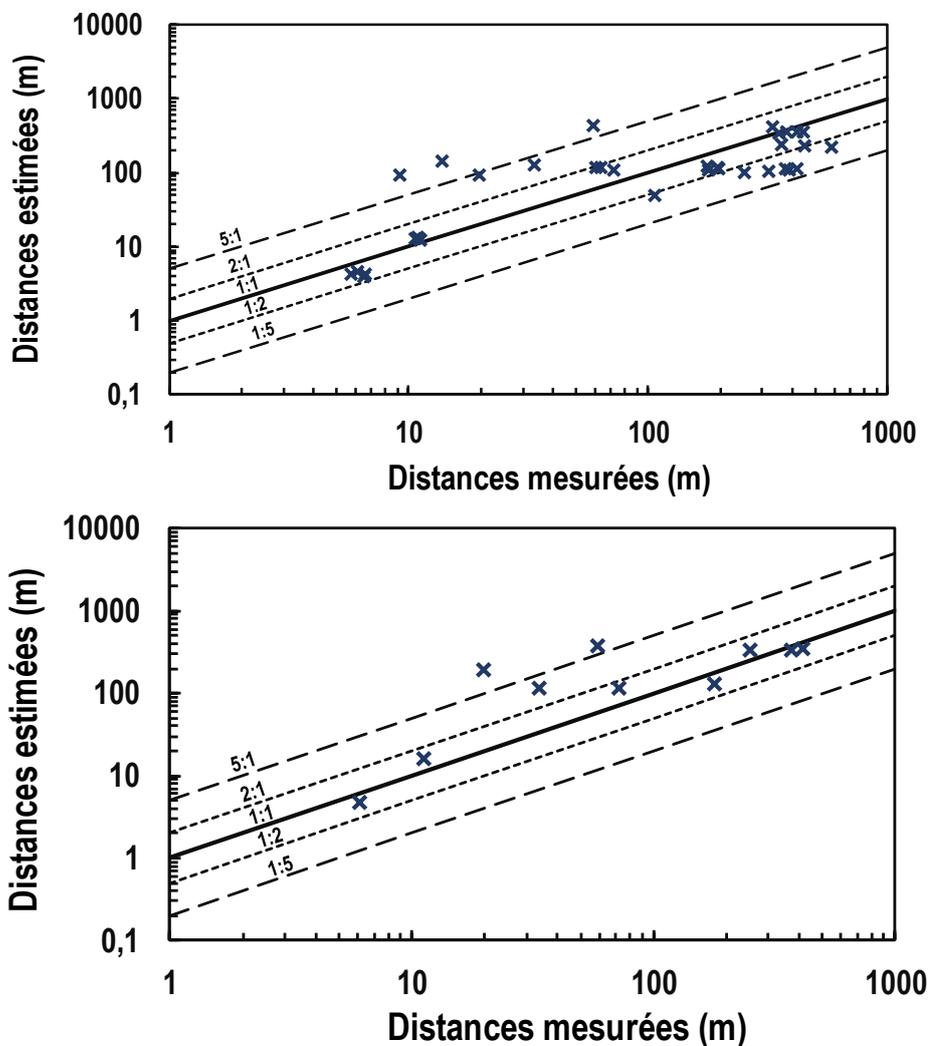
qui explique d'une façon statistiquement robuste (R^2 ajusté = 0.72 ; p-valeur < 0.05) les données de traçage RFID disponibles pour le Rhône.

Afin d'évaluer la puissance prédictive de l'équation 7, nous avons appliqué trois procédures différentes de validation croisée : i) nous avons d'abord retiré successivement chaque suivi du jeu de données, recalibré le modèle de l'éq 6 et appliqué le modèle de régression obtenu pour estimer les distances de transport pour chaque site écarté (méthode « *Jackknife* ») ; ii) nous avons aussi calibré le modèle de l'éq. 6 avec 25 points (70% du jeu des données) et ensuite validé le modèle calibré à partir des 10 autres points (30% du jeu de données, extrait aléatoirement) ; iii) enfin, nous avons extrait successivement les données issues de chaque suivi, recalibré le modèle avec les données des autres suivis et validé avec les données du suivi retiré du calcul.

La première procédure de validation croisée (« *jackknife* ») a donné une valeur médiane pour le rapport entre distances prédites et mesurées de 0,8 (+/- 2,6), avec 63% des estimations dans une fourchette de 0,5-2 fois les valeurs mesurées et 89% des estimations dans une fourchette d'un ordre de grandeur (0,5-5 fois les valeurs mesurées) (Figure 29 supérieure). La deuxième procédure de validation croisée donne des résultats semblables : un rapport médian entre distances estimées et mesurées de 1,4 (+/- 3,1), avec 70% des valeurs dans un rapport de 0,5 à 2 fois les valeurs mesurées et 80% des estimations dans un rapport de 0,2 à 5 fois les valeurs mesurées (figure 29 milieux). La troisième méthode de validation montre les performances les moins bonnes : un rapport médian entre valeurs estimées et mesurées de 0,49 (+/- 4,7), avec 20% des estimations dans un rapport de 0,5 à 2 fois les valeurs mesurées et 69% des points dans une fourchette d'un ordre de grandeur de 0,2 à 5 fois les valeurs

mesurées (Figure 29 inférieure). Cela souligne l'importance d'inclure des données observées sur une large gamme de sites et pour des conditions hydrologiques variées pour pouvoir calibrer un modèle comme celui de l'équation 6.

En résumé, l'analyse de la puissance prédictive du modèle des distances moyennes de transport des traceurs dans le Rhône, présenté avec l'équation 7, souligne des résultats prometteurs : presque 60-70% des estimations se trouvent dans une fourchette très serrée autour des valeurs mesurées (rapport 0,5 :2) et 80-90% des valeurs dans une fourchette d'un ordre de grandeur (rapport 0.2 :5). Cela est un bon résultat, compte tenu des incertitudes intrinsèques à toutes les estimations de transport solide en rivières naturelles. Néanmoins, la validation croisée souligne aussi la nécessité d'inclure une gamme assez large de sites et de conditions hydrologiques dans le jeu des données, du fait de la forte sensibilité des modèles de régression multivariée comme celui utilisé pour ce travail. Les paramètres de calibration du modèle de régression vont évoluer au fur et à mesure que les résultats des suivis vont enrichir la base de données ce qui est prometteur pour la suite de ces travaux.



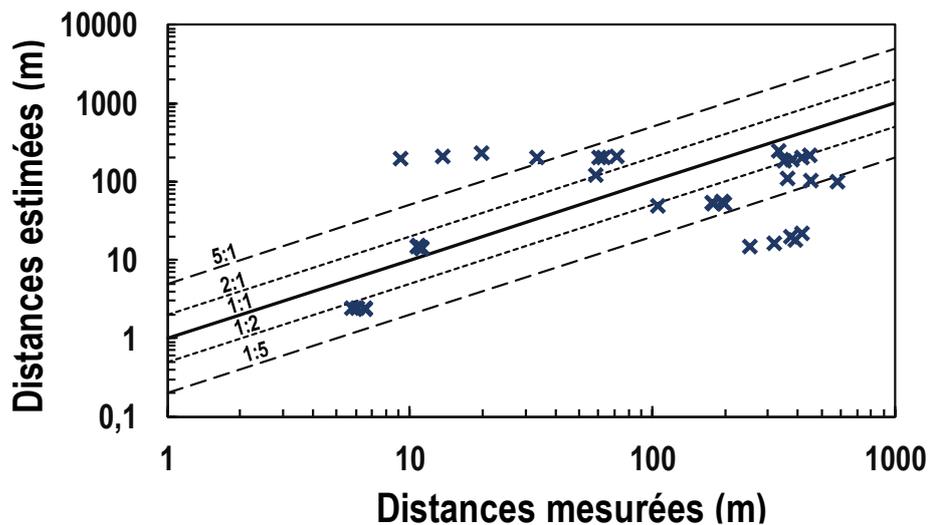


Figure 29. Comparaison entre le jeu de données du Rhône et une base de données de traçage sédimentaire compilée de la littérature par Vázquez-Tarrío et al. (2019).

3.5. Comparaison entre la distance mesurée et l'estimation de la capacité de transport par charriage

En principe, les volumes de sédiment mobilisés au cours d'un événement doivent être corrélés avec les distances de propagation des particules. D'une façon simpliste, nous pouvons représenter les volumes de sédiment transportés par charriage lors d'un événement de crue sous la forme d'un polyèdre irrégulier défini sur trois dimensions constituées par : l'épaisseur de la couche active, la largeur du chenal actif et la distance de transport des particules en mouvement (Vázquez-Tarrío et Batalla, 2019 ; Vázquez-Tarrío et al., 2019a). Cette idée peut être formalisée de la façon suivante :

$$V = L \cdot Prof \cdot \gamma \cdot B \cdot p \quad \text{Éq. 8}$$

où L est la distance moyenne de transport des particules, $Prof$ est la profondeur moyenne de la couche de sédiment du lit morphologiquement active, γ est la fraction des particules mobiles du lit, B est la largeur du chenal et p la porosité moyenne du sédiment du lit.

Dans le cadre de l'OSR4 (Tal et al., 2018), nous avons réalisé des estimations de transport par charriage sur tout le linéaire du Rhône pour différents débits. Nous avons, alors, appliqué ces estimations aux différentes périodes hydrologiques correspondant aux mesures par traçage sédimentaire et nous avons fait une estimation des volumes de sédiment mobilisés au cours des différents événements enregistrés par les suivis réalisés. La comparaison de ces estimations et des distances moyennes de transport mesurées avec les traceurs montre une corrélation positive faible (Figure 30). Cependant, cette corrélation augmente quand on exclut les données du site des marges à Péage-de-Roussillon, qui montrent des distances de transport très faibles par rapport aux estimations de transport par charriage pour la période. Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, le fait que les traceurs aient été déployés sur la marge du chenal les expose à une hydraulique locale et influence les distances de déplacement qui sont plus faibles que celles auxquelles on pouvait s'attendre si les traceurs avaient

été déployés dans le chenal principal (comme c'est le cas des traceurs associés à la réinjection de la Platière).

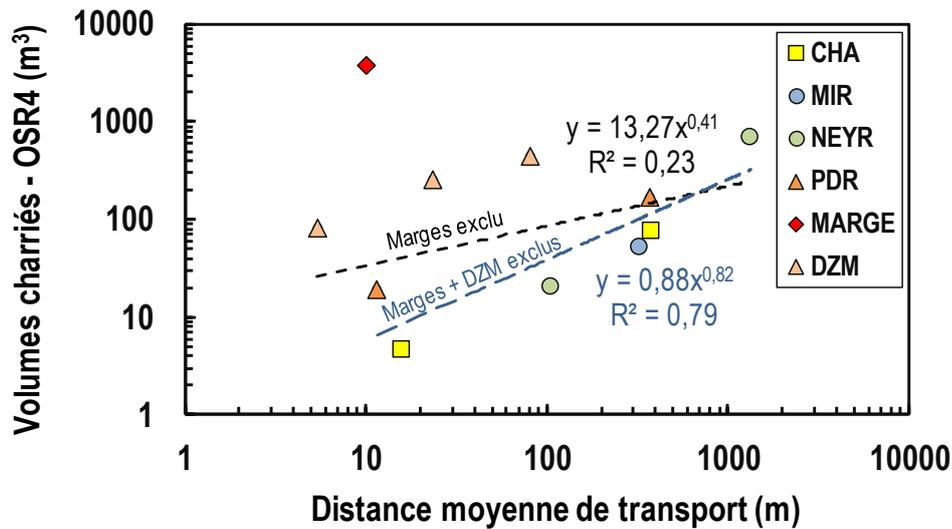


Figure 30. Comparaison entre les volumes de transport par charriage dérivés des estimations formulées dans le cadre de l'OSR4 et les distances de transport moyenne mesurées sur le terrain.

Les données du secteur de Donzère ont aussi tendance à se positionner dans l'enveloppe supérieure du nuage de points. Globalement, Il semble que dans les autres secteurs d'étude les distances de transport mesurées soient aussi plus courtes que celles auxquelles on pourrait s'attendre à partir des estimations de transport par charriage. Le jeu de données disponibles ne permet pas d'aller plus loin. Toutefois, la perte des traceurs transportés plus à l'aval (« *frontrunners* ») que la zone de prospection et qui ne sont donc pas retrouvés, pourrait expliquer cette tendance.

À partir des estimations de transport par charriage issues des données de l'OSR4 et de l'équation 8, nous avons aussi réalisé une estimation de l'épaisseur moyenne de la couche active pendant les différentes périodes hydrologiques étudiées. Pour cela, nous avons estimé d'abord γ et B . Pour γ , nous avons utilisé lors de chaque suivi le pourcentage de traceurs par rapport au total de traceurs retrouvés, se déplaçant plus de 10 m. Pour B nous avons fait une approximation à partir de l'enveloppe de l'empreinte des traceurs retrouvés sur chaque site d'étude.

Malheureusement, nous n'avons pas de données de terrain pour valider nos estimations de l'épaisseur moyenne de la couche morphologiquement active (mesures de terrain avec chaînes d'érosion ou colonnes RFID, suivi topographique). La seule stratégie de validation semble être alors la comparaison avec d'autres données de la littérature (Figure 31). Cette comparaison nous montre pour le Rhône une épaisseur de la couche morphologiquement active, en général, plus faible par rapport à la base de données tirées de la littérature (compilées par Vázquez-Tarrío et al., 2021). Cela pourrait être lié à la nature pavée du lit du Rhône. Une exception est le cas du secteur de Donzère, ce qui souligne à nouveau les incertitudes liées aux mesures de terrain et la possibilité que les distances de transport mesurées soient sous-estimées dans ce secteur. Malheureusement, l'absence de données terrain ou topographiques concernant l'évolution verticale du lit du Rhône ne nous permet pas d'aller plus loin dans cette analyse.

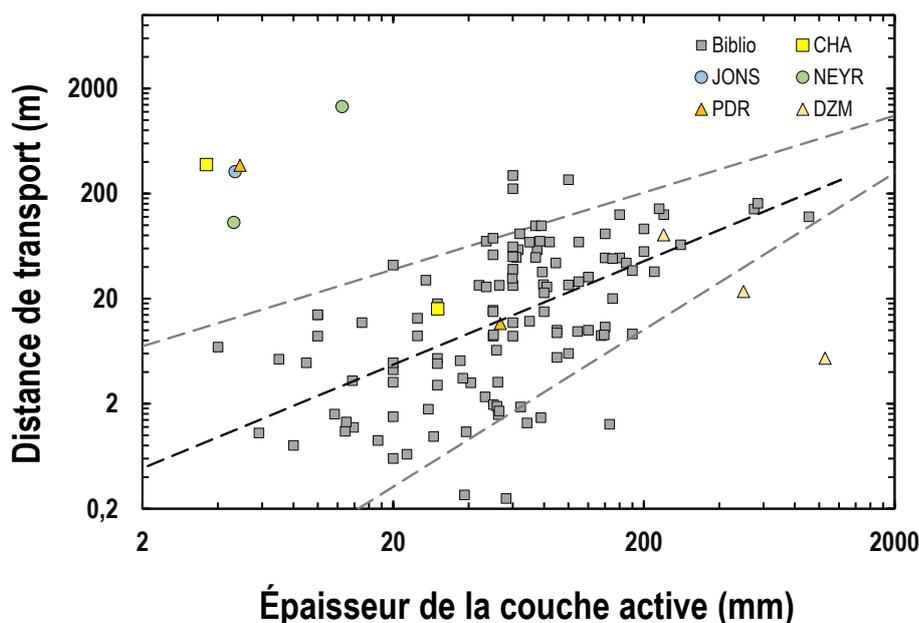


Figure 31. Distances de transport des particules et épaisseur estimée de la couche morphologiquement active. Données du Rhône comparées avec une large base de données de la littérature compilée par Vázquez-Tarrío et al. (2021).

4. EVALUATION DU TEMPS NÉCESSAIRE A L'EXPORT DU SÉDIMENT HORS DES RCC

4.1. Introduction

La Directive Cadre sur l'Eau instaure l'obligation de protéger et restaurer la qualité des eaux et des milieux aquatiques. Dans ce cadre-là, le SDAGE RM recommande de réaliser des recharges sur plusieurs tronçons du Rhône. Des recharges sédimentaires ont ainsi été réalisées ces dernières années ou sont encore en prévision sur différents secteurs du Rhône. La Compagnie Nationale du Rhône souhaite dans ce cadre s'assurer de la sûreté hydraulique de ses aménagements, notamment en tentant de répondre aux incertitudes de gestion à long terme. Ces incertitudes concernent plus précisément les temps de transfert des sédiments réinjectés jusqu'à la retenue de barrage localisée à l'aval des points d'injection et les conditions de transparence sédimentaire des retenues. Ceci représente un enjeu de gestion important des barrages.

Dans cette section, nous décrivons une méthodologie permettant d'évaluer le temps nécessaire à l'export du sédiment hors des RCC. La démarche consiste à combiner des calculs de transport par charriage avec des estimations de la distribution des distances de transport des particules sédimentaires, déduites des données de traçage disponibles pour le Rhône. Ensuite, afin d'illustrer la puissance de cette démarche, nous l'appliquons à deux secteurs d'étude : les secteurs de Donzère et de Péage-de-Roussillon.

4.2. Présentation de la méthodologie

La méthode de travail proposée repose sur quatre étapes (Figure 32) :

- Etape 1 : établissement d'une grille de modélisation 1D. Le noeud le plus à l'amont de cette grille de modélisation correspond au point d'injection de la recharge sédimentaire. Le noeud le plus à l'aval correspond au barrage du secteur d'étude.
- Etape 2 : nous associons à chaque noeud une valeur de capacité annuelle de transport par charriage.
- Etape 3 : nous associons également à chaque noeud une valeur de la distance moyenne de propagation des particules injectées et une distribution de probabilité des distances de déplacement autour de cette moyenne.
- Etape 4 : nous lançons la simulation, avec une injection du volume de sédiment dans le noeud amont et une remobilisation ensuite du sédiment injecté au cours du temps.

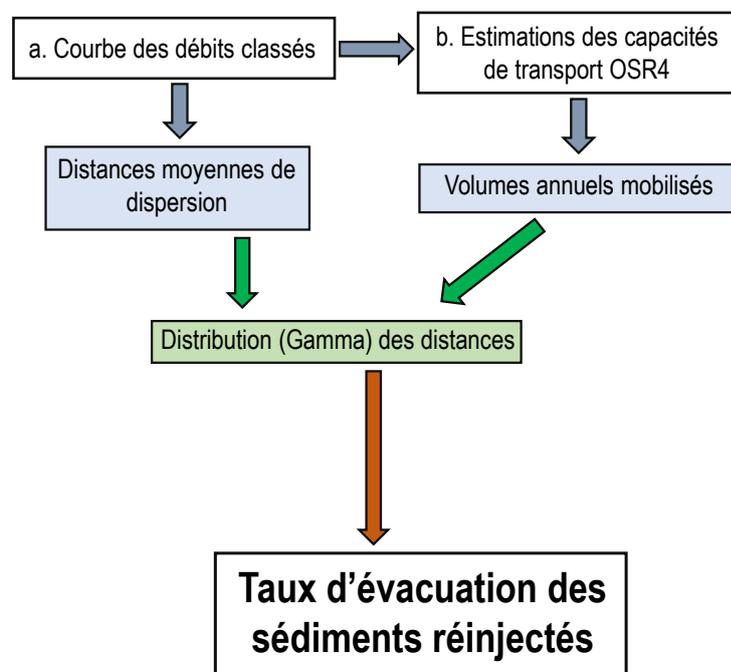


Figure 32. Schéma méthodologique suivi pour l'estimation des temps d'évacuation des sédiments réinjectés dans les RCC.

4.3. Estimation des capacités de transport par charriage

Afin d'estimer les capacités annuelles de transport par charriage, nous avons exploité un modèle hydraulique 1D calibré pour le Rhône et implémenté sur MAGE par l'INRAE dans le cadre des travaux de recherche de l'OSR4. Ce modèle hydraulique utilise un profil topobathymétrique réel tous les 500 m et un profil interpolé tous les 100 m. Il intègre les règles de fonctionnement des différents barrages et canaux de dérivation. Le modèle hydraulique donne, comme résultat de chaque simulation, et pour chaque transect : la vitesse d'écoulement moyenne dans la section, la vitesse moyenne dans le lit mineur, la surface et le périmètre mouillé. La procédure suivie pour l'estimation des capacités de transport par charriage à partir de sorties du modèle MAGE est la suivante (Figure 33; décrite dans le rapport de l'OSR4 et Vázquez-Tarrío et al., 2019b) :

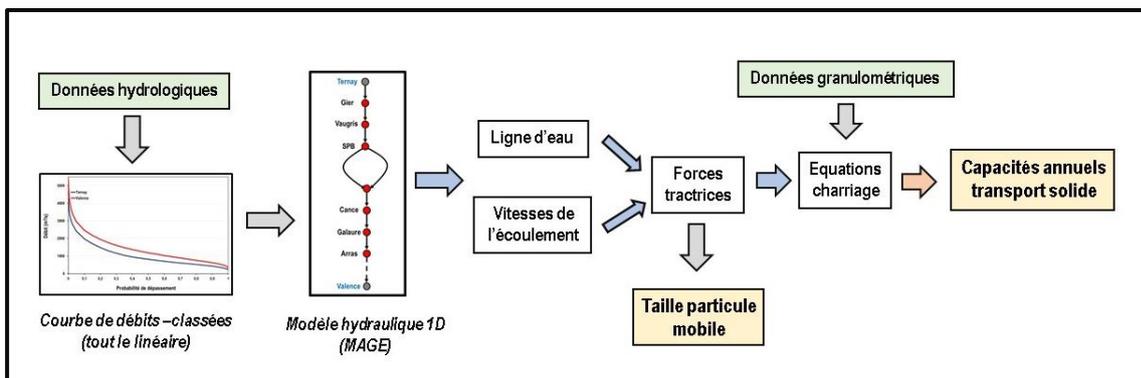


Figure 33. Chaîne de traitement suivie pour caractériser le transport par charriage dans le Rhône.

- Etape 1 : nous avons récupéré la courbe des débits classés du secteur du Rhône concerné. Nous avons discrétisé cette courbe des débits classés et nous avons seulement considéré les débits avec les probabilités de non dépassement suivantes : 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95%, 97.26%, 99.86% (~Q2), 99.95% (~Q5) et 99.997% (~Q10). Puis, nous avons lancé une simulation pour chacun de ces débits (en régime permanent) avec le modèle hydraulique 1D implémenté sur MAGE.
- Etape 2 : À partir de la valeur de la vitesse d'écoulement dans le lit mineur (V_m) (en m/s), nous estimons la pente d'énergie (S_f) (en m/m) pour chaque transect du modèle, à partir de la formule de Manning :

$$S_f = \left(\frac{V_m}{K \cdot R^{2/3}} \right)^2 \quad \text{Éq. 9}$$

où K est le coefficient de frottement avec lequel le modèle a été calé et R est le rayon hydraulique (en m), estimé comme le rapport entre la surface (en m^2) et le périmètre mouillés (en m).

- Etape 3 : avec la pente d'énergie, nous estimons les forces tractrices (en N/m^2 ou Pa), à partir du produit de la pente et du rayon hydraulique :

$$\tau = \rho \cdot g \cdot S_f \cdot R \quad \text{Éq. 10}$$

où ρ est la masse volumique de l'eau (1000 kg/m³) et g l'accélération de la gravité (9,81 m/s²).

- Etape 4 : Nous appliquons aussi un facteur de correction, afin de quantifier les contraintes effectives (τ_{eff}) (en N/m²) qui agissent sur les grains ou particules du lit :

$$\tau_{eff} = \tau \cdot \left(\frac{D_{90}^{1/6} \cdot K}{26} \right)^{3/2} \quad \text{Éq. 11}$$

où D_{90} est le 90ème percentile de la distribution granulométrique de surface (en m).

- Etape 5 : Une fois calculées les contraintes hydrauliques, nous avons calculé le débit solide de transport par charriage (q_s) (en m³/s) pour chaque débit considéré, à partir de la formule de Recking (2013) et Recking et al. (2016) :

$$q_s = \sqrt{g \cdot 1.65 \cdot D_{84}^3} \cdot \frac{\tau^{*2.5}}{1 + \left(\frac{\tau_m^*}{\tau^*} \right)^4} \cdot B \quad \text{Éq. 12}$$

où D_{84} est le percentile 84 de la distribution granulométrique (en m) des sédiments qui se déplacent, B est la largeur de l'écoulement (en m), τ^* est la contrainte adimensionnelle de Shields et τ_m^* est la valeur-seuil de ce paramètre pour la rupture de l'armourage. Ces deux paramètres ont été estimés à partir des formules suivantes :

$$\tau^* = \frac{\tau_{eff}}{1650 \cdot g \cdot D_{84}} \quad \text{Éq. 13}$$

$$\tau_m^* = 1.5 \cdot S_f^{0.75} \quad \text{Éq. 14}$$

- Etape 6 : Une fois estimé le taux de charriage pour chacun des débits dont on avait discrétisé la courbe des débits classés, nous avons intégré les estimations partielles, afin de calculer une capacité de transport annuelle moyenne (Q_s) (en m³ ; volume de grain de densité 2.6 - sans les vides) :

$$Q_s = \sum q_{s_i} \cdot \Delta t_i \quad \text{Éq. 15}$$

où q_{s_i} est le taux de charriage estimé pour chaque débit i considéré et Δt_i la durée annuelle assignée à ce débit, estimée à partir de :

$$\Delta t_i = \frac{(P_{i+1} - P_i) + (P_i - P_{i-1})}{2} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \quad \text{Éq. 16}$$

où P est la probabilité de non dépassement.

À propos de toutes les formules précédentes, la question se pose de savoir quelle granulométrie utiliser pour réaliser les différents calculs : celle de la surface du lit ou celle du sédiment injecté ? À cet égard, nous proposons d'utiliser la granulométrie de la surface du lit pour l'estimation de la rugosité hydraulique et les contraintes de grain (éq. 11), mais celle de la granulométrie du sédiment injecté quand on estime les taux de charriage (éqs. 12 et 13). Nous nous appuyons sur la proposition de Piton et al. (2016) et Piton et Recking (2017), qui ont suggéré d'utiliser la granulométrie du lit pour résoudre l'hydraulique et la granulométrie du sédiment mobile pour estimer le charriage, quand on est en face d'une situation où nous avons du transport de sédiment relativement fin en transit sur un lit structuré ou relativement immobile.

Par ailleurs, afin de caractériser le mieux possible la granulométrie du lit du Rhône, nous avons utilisé les échantillons collectés dans le cadre de la thèse d'Elsa Parrot (2015). Comme nous n'avons que des données granulométriques tous les ~2-3 km, et que la géométrie utilisée pour la modélisation sur MAGE s'appuie sur un profil transversal toute les 100 m, nous avons dû définir une procédure pour densifier la granulométrie. Ainsi, nous avons fait une interpolation linéaire entre chaque paire d'échantillons granulométriques.

4.4. Estimation des distances de transport

Afin de modéliser les distances de propagation des particules sédimentaires dans les RCC, nous avons utilisé les résultats des suivis de traçage sédimentaire déjà réalisés dans le cadre de l'OSR5. Ces résultats montrent des rapports assez constants entre les différents paramètres des distributions des distances de transit. Ainsi, nous constatons des relations presque linéaires entre les distances moyennes de dispersion et les distances maximales et même l'écart-type des distances de transit (Figure 34). Ces résultats suggèrent que la forme de la distribution des distances de transit est plutôt constante au cours des déplacements des particules, pour les suivis dont nous disposons.

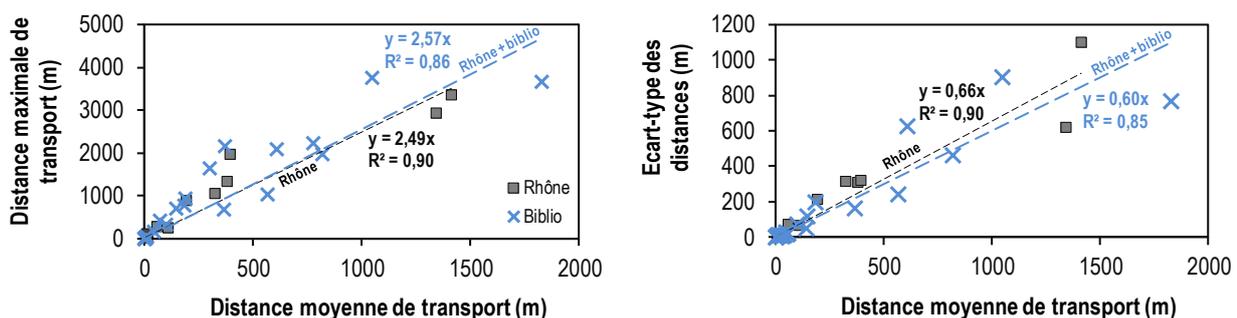


Figure 34. *Gauche* : Distance moyenne de transport vs distance maximale. *Droite* : Ecart-type des distances de transport vs distance moyenne pour les suivis de traçage sédimentaire acquis sur le Rhône. Les données du Rhône ont été comparées avec une base de données compilées de la littérature : Ferguson and Wathen (1998), Liébault et al. (2012), Bradley and Tucker (2012), Schneider et al. (2014), Dell’Agnese et al. (2015) et Arnaud et al. (2017).

Etablir un paramètre de normalisation adéquat est ainsi possible et permettrait de trouver une «forme» de distribution commune aux différents secteurs d'étude. À cet égard, Phillips et al. (2014)

ont observé que, en normalisant les distances de transit des particules par la distance moyenne de transport, les distributions pour différents suivis ont une tendance à converger vers une tendance commune. Ainsi, nous avons normalisé les distances de transports des différents secteurs du Rhône (et périodes) par la distance moyenne de transport de chaque suivi. En effet, nous observons que les différentes distributions convergent vers une distribution très similaire (Figure 35), de type loi gamma.

Suite à ces résultats, nous avons décidé de modéliser les distributions des distances à partir d'une loi de distribution gamma, centrée autour de la moyenne et avec un écart-type ~ 0.66 fois la moyenne (comme montré dans la Figure 34). Ainsi, le problème de la modélisation des distances de propagation dans un transect quelconque est simplifié au problème de l'estimation des distances moyennes de propagation. À cet égard, nous proposons d'utiliser le modèle de régression linéaire multiple présenté dans la section précédente (éq. 7) pour estimer la distance de transit moyenne.

Nous avons ainsi appliqué l'équation 7 sur chacun des débits dont on avait discrétisé la courbe des débits classés et pour chacun des transects utilisés dans le modèle MAGE (\sim tous les 100 m) et nous avons estimé la distance annuelle moyenne de déplacement. Pour l'estimation du débit critique (nécessaire pour appliquer l'équation 7), nous avons utilisé les résultats de la section 3.2. Ainsi, à partir des résultats du modèle MAGE, nous avons établi pour chaque transect une courbe « débit vs contraintes adimensionnelles ». Nous avons choisi comme critère pour le débit critique celui qui correspond à une contrainte adimensionnelle égale à 0.03.

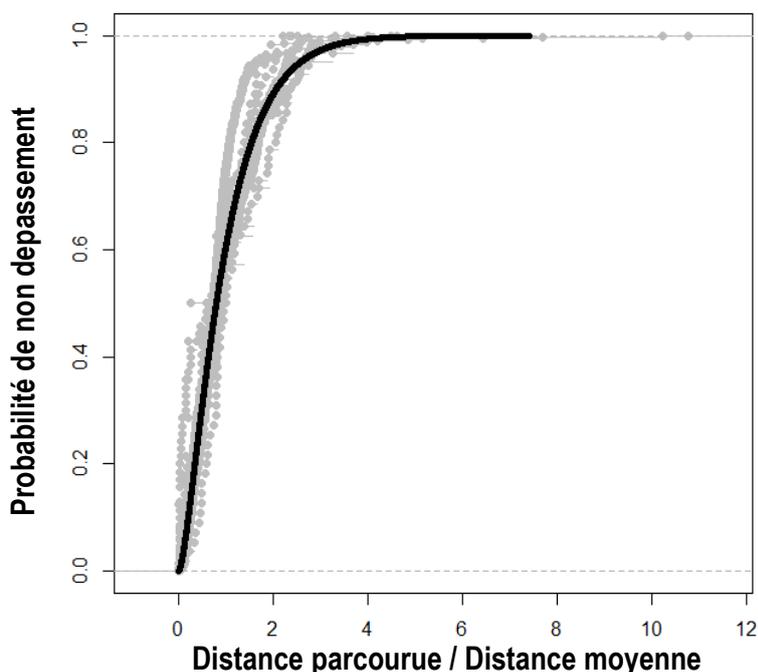


Figure 35. Loi de distribution gamma, ajustée aux distributions empiriques des distances des suivis de traçage sédimentaire réalisés sur le Rhône.

4.5. Implémentation

Une fois que les capacités annuelles de transport par charriage et les distances moyennes de propagation des particules ont été estimées, nous pouvons appliquer la chaîne de modélisation déjà présentée dans la section 4.2 :

1. Nous réalisons une grille de modélisation, avec un noeud tous les 100 m. Le noeud le plus à l'amont de cette grille de modélisation correspond au point d'injection de la recharge sédimentaire. Le noeud le plus à l'aval correspond au barrage aval du secteur d'étude. De cette façon, nous modélisons le continuum RCC-RT.
2. À chaque noeud de cette grille de modélisation, nous associons une capacité de transport par charriage et une distance moyenne de propagation. Pour faire cela, une fois définis la grille et les différents noeuds, nous faisons une interpolation linéaire sur les résultats obtenus avec les procédures décrites dans les sections 4.2 (capacités de transport) et 4.3 (distances de transport).
3. Ensuite, nous réalisons une première simulation, correspondant à la première année après l'injection. Pour faire ce « *run* », nous injectons dans le noeud le plus à l'amont un volume de sédiment correspondant à celui de la recharge sédimentaire, et nous appliquons la règle suivante afin de définir les volumes de sédiment à mobiliser :
 - Si les capacités de transport dans le noeud sont supérieures au volume de sédiment injecté, nous ne mobilisons que les sédiments injectés.
 - Si les capacités de transport dans le noeud sont inférieures au volume de sédiment injecté, on mobilise un volume égal à la capacité de transport dans le noeud, l'autre partie du volume de sédiment restant sur place.

Une fois quantifiés les volumes de sédiment à mobiliser, nous faisons transiter ce sédiment vers l'aval. Pour cela, on récupère d'abord la distance moyenne de transport attribuée au noeud amont, et nous distribuons les volumes mobilisés dans les noeuds situés à l'aval selon une distribution de fréquence de type gamma (tel qu'expliqué dans la section 4).

Les résultats du premier pas de simulation représentent les conditions de démarrage pour le deuxième pas de simulation.

4. Lors du second pas de simulation, ainsi que pour les pas suivants, nous répétons le même schéma, mais avec de légères modifications :
 - Pour chaque noeud de la grille de modélisation, nous récupérons la valeur de la capacité de transport assignée et nous calculons les volumes de sédiment à mobiliser selon la règle suivante :
 - Si les capacités de transport dans le noeud sont supérieures au volume de sédiment injecté, nous ne mobilisons que les sédiments injectés.
 - Si les capacités de transport dans le noeud sont inférieures au volume de sédiment injecté, on mobilise un volume égal à la capacité de transport dans le noeud, l'autre partie du volume de sédiment restant sur place.
 - Une fois les volumes de sédiment à mobiliser ainsi définis dans chaque noeud, nous récupérons la valeur de la distance moyenne assignée au noeud et définissons une distribution des fréquences des distances de mobilisation des noeuds aval, selon une loi de fréquence de type gamma.
 - Nous commençons par le noeud le plus à l'amont. Nous mobilisons vers l'aval le sédiment stocké. Nous répétons ensuite la même procédure avec le noeud immédiatement plus à

l'aval et successivement avec tous les nœuds suivants. À la fin, nous sommes les résultats des volumes mobilisés à l'aval des différents noeuds, et nous retombons sur une distribution des volumes des sédiments stockés temporairement dans les différents noeuds.

- Le résultat issu de chaque pas de simulation va représenter la condition initiale pour le pas de simulation suivant. Comme nous avons intégré nos calculs sur la courbe des débits classées pour l'estimation des capacités de transport et les distances moyennes, chaque pas de simulation représente un pas de temps d'un an.

4.6. Exemples d'application

4.6.1. La réinjection de la Platière à Péage de Roussillon

Dans le secteur du Péage de Roussillon, une opération de recharge sédimentaire a été réalisée durant l'année 2017. Un volume de 6000 – 7000 m³ de sédiments a été injecté au niveau du PK 52-52.5. La question se pose de savoir quel est le temps qui est nécessaire pour évacuer le sédiment en dehors du RCC et combien de temps va mettre le sédiment injecté pour arriver à la retenue du barrage d'Arras. Nous avons alors appliqué la démarche présentée précédemment afin d'apporter quelques éléments de connaissance sur le comportement de la recharge sédimentaire.

Ainsi, nous avons modélisé le comportement de la recharge sédimentaire sur une période de 50 ans (Figure 36). Les résultats montrent que des zones de stockage sédimentaire préférentielles se forment au bout de 50 années. Certains de ces sites de stockage correspondent dans certains cas à des zones de dragages historiques. Un exemple de ce type est l'extraction entre les PK 72,5 et 73,5 (en 1983).

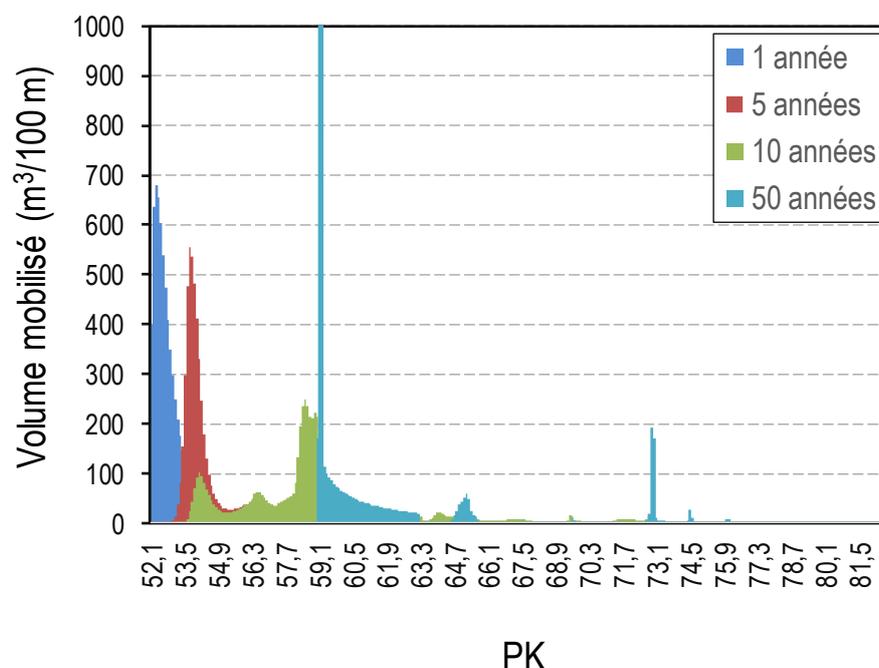


Figure 36. Résultats de la modélisation du temps de transit du sédiment réinjecté dans le cadre de la recharge sédimentaire de la Platière, à Péage de Roussillon.

En général, les résultats de ces travaux de modélisation sur ce secteur suggèrent un transfert lent de la charge sédimentaire dans ce RCC, avec des volumes de sédiment importants qui restent encore dans le RCC au bout de 50 années (Figure 37).

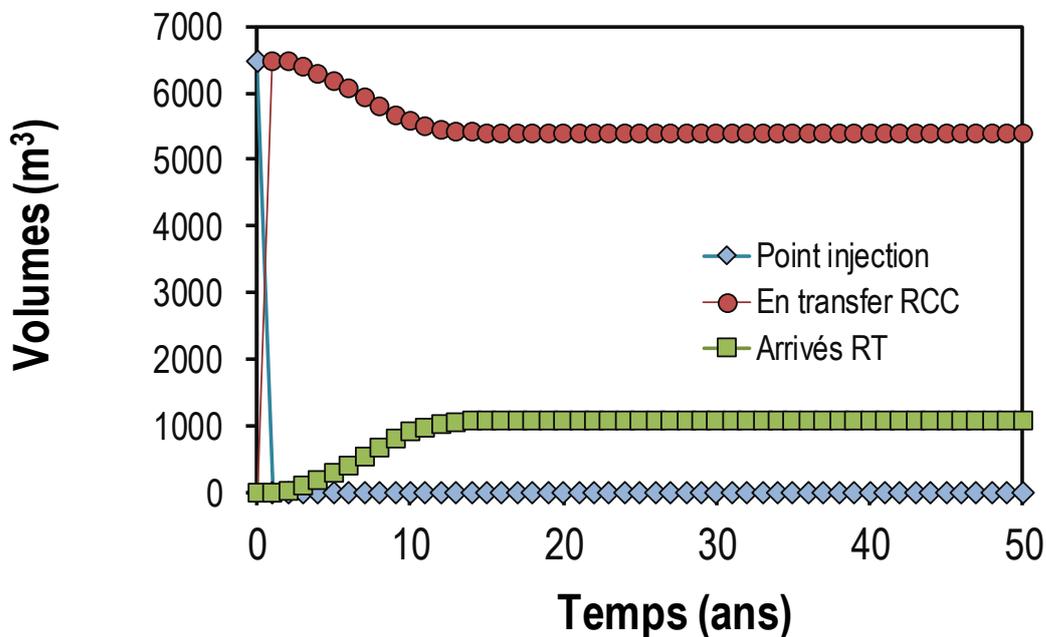


Figure 37. Résultats de la modélisation de l'évolution temporelle du stockage du sédiment réinjecté, dans les différents compartiments du canal du Rhône dans le secteur de Péage de Roussillon.

4.6.2. La recharge sédimentaire à Donzère

Lors des travaux de redynamisation des marges et îlons du Rhône dans le secteur de Donzère, autour de 30 000 m³ de sédiment grossier ont été extraits des bras secondaires et réincorporés au RCC, avec deux points de recharge principaux : i. au niveau de la lône des Dames (autour de PK 176,5), 20 000 m³ de sédiments grossiers (avec une taille médiane de 35 mm) ont été réincorporés au chenal principal du Rhône; ii. au niveau de Banc Rouge (autour de PK 186), autour de 10 000 m³ de sédiments grossiers (taille médiane de 31 mm) ont été réinjectés.

Les partenaires du projet, notamment la CNR, souhaitent ainsi avoir une idée du temps nécessaire à l'évacuation des sédiments réinjectés. Nous avons ainsi réalisé un travail de modélisation sur ce secteur. Nous avons modélisé le comportement de la réinjection sur une période de 50 ans (Figure 38). Dans ces résultats, les deux points d'injection bien distincts sont visibles et une fragmentation progressive des deux panaches sédimentaires est mise en évidence au cours du temps. Au cours de 50 ans, les résultats soulignent qu'une part assez importante des sédiments injectés va être encore en transit dans le RCC (Figure 39).

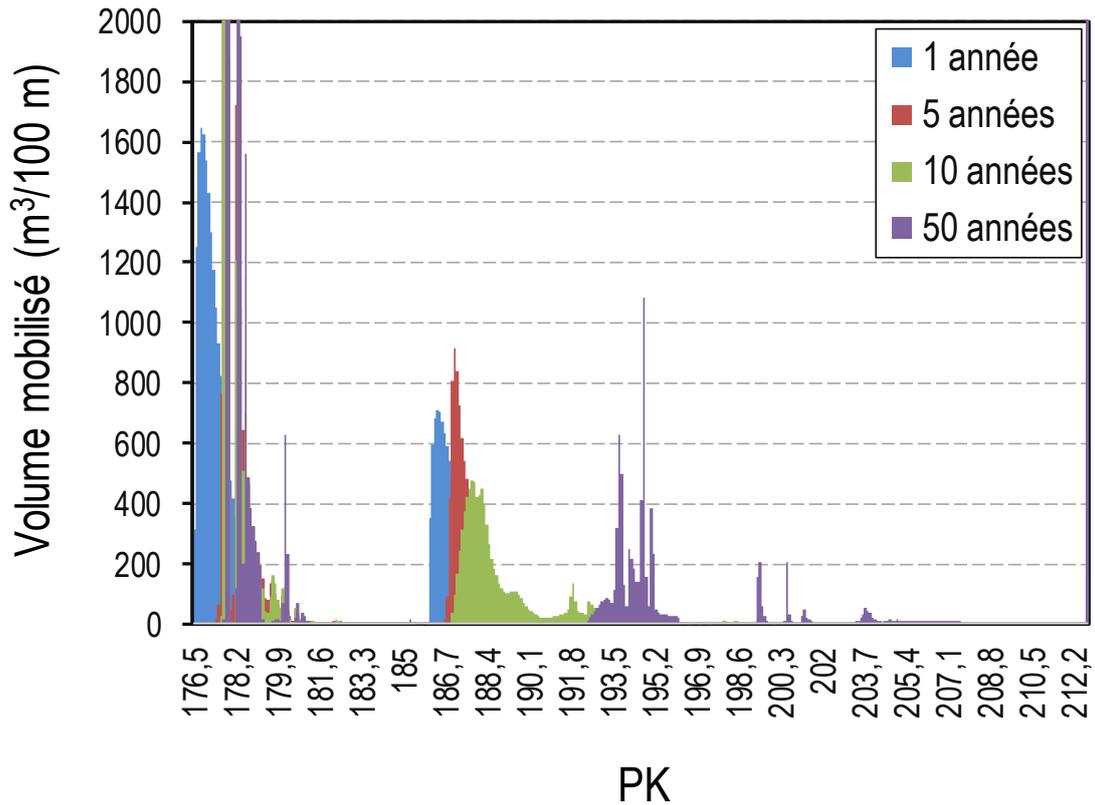


Figure 38. Résultats de la modélisation du temps de transit du sédiment réinjecté dans le cadre de la recharge sédimentaire à Donzère.

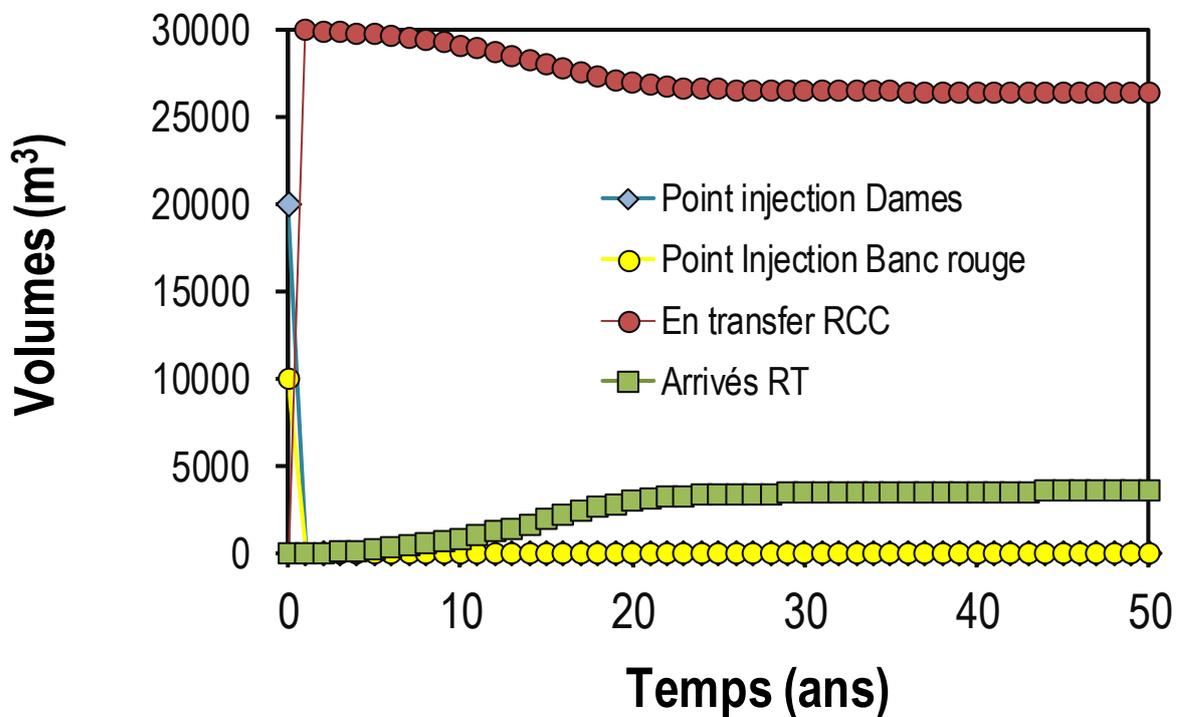


Figure 39. Résultats de la modélisation de l'évolution temporelle des stocks de sédiment réinjecté, dans les différents compartiments du chenal du Rhône dans le secteur de Donzère.

4.7. Limites

L'approche de modélisation proposée présente certaines limites qu'il faut considérer et bien prendre en compte lors de l'interprétation des résultats :

- La méthode de modélisation ne prend pas en compte les interactions entre le matériel réinjecté et le sédiment du lit. Si les tronçons sont fortement pavés, cela ne pose probablement pas de gros problèmes. Mais là où il peut y avoir un transport solide plus actif, cette limite est à considérer.
- Le modèle ne considère pas de changement dans la topographie et/ou de la pente du fond du lit. Normalement, les volumes de sédiment injectés ne sont pas assez importants pour induire des changements considérables dans le fond du lit. Cependant, si on applique la méthode proposée ici pour modéliser une situation dans laquelle la fourniture sédimentaire serait illimitée, nous nous attendons à un ajustement progressif du lit et cette méthode ne serait alors plus adaptée pour prendre en compte ces ajustements et les effets induits sur le transport par charriage. Dans le cadre de la formation d'un matelas alluvial morphodynamiquement actif, les incertitudes seront importantes.
- Le modèle de distance est encore récent (3 années des mesures). Ce modèle est à ajuster au fur et à mesure de l'obtention des résultats de nouveaux suivis de traçage sédimentaire.
- En définitive, le modèle est proposé pour estimer des distances de transport parcourues sur le long terme dans des secteurs initialement pavés et pour des quantités introduites qui restent modestes, mais pour l'instant nous manquons d'éléments de validation de ces prédictions sur de longues durées.

5. CONCLUSIONS / PERSPECTIVES

Dans ce rapport, nous avons présenté les travaux menés dans le cadre de l'OSR5, pour la caractérisation du transport par charriage et le transit de la charge de fond dans le Rhône. Plusieurs opérations de suivi de la charge de fond par traçage sédimentaire (s'appuyant sur la technologie RFID) ont été mises en oeuvre dans le Rhône au cours de ces dernières années.

Dans la première partie du rapport, nous avons présenté les différents sites d'étude et leurs caractéristiques générales, ainsi que les principales observations de terrain effectuées lors des suivis déjà réalisés. Une base de données assez inédite et s'appuyant sur ces observations est ainsi en cours de structuration et pourra être enrichie. Dans la deuxième partie de ce rapport nous avons approfondi les analyses de ces données disponibles afin de caractériser les débits critiques de mise en mouvement, la taille de particules mobiles et les distances de propagation du sédiment.

Dans la troisième partie du rapport, nous avons intégré ces observations de terrain dans un travail de modélisation hydrosédimentaire mené dans le cadre de l'OSR4. Nous avons ainsi essayé de proposer un protocole méthodologique permettant d'estimer les temps de transit des sédiments dans le Rhône. Cette information est essentielle pour la conception et le dimensionnement adéquat des futures opérations de recharge sédimentaire. Afin d'illustrer le potentiel de l'approche, nous avons appliqué le protocole à deux cas : la réinjection de la Platière à Péage de Roussillon et une recharge sédimentaire dans le secteur de Donzère.

Malgré les progrès réalisés dans la caractérisation de la charge de fond dans le Rhône, il reste encore des perspectives d'approfondissement et d'amélioration :

- Des difficultés inhérentes au suivi des traceurs sur le terrain se traduisent par une perte progressive de traceurs au cours du temps. Cela pose des problèmes lorsqu'il s'agit de bien caractériser les différents paramètres statistiques associés à la propagation des particules (distance moyenne, maximale, écart-type). Il semble judicieux de continuer à faire des injections successives de traceurs afin de compenser ces pertes et enrichir la base des données avec une gamme la plus large possible de conditions hydromorphologiques.
- Le modèle présenté pour l'estimation des temps d'évacuation des sédiments grossiers ne prend pas en compte l'évolution verticale du lit. Il serait ainsi intéressant de compléter cette démarche avec deux types d'informations de terrain différentes : i. d'abord, des observations diachroniques de l'évolution de la topographie du lit du Rhône (par exemple, avant-après les recharges sédimentaires) ; ii. des observations du comportement de la couche active (épaisseur, colmatage) qui permettent de compléter l'observation des distances de propagation.
- Des pistes intéressantes concernent également l'amélioration du travail de modélisation des temps de transit de la charge de fond, proposé ici. Il serait tout d'abord utile d'incorporer le tri granulométrique dans le modèle et compléter la modélisation des temps de transit avec des informations sur le comportement des différentes classes de taille. Il serait aussi intéressant d'incorporer au modèle la possibilité que le sédiment puisse traverser le barrage

aval : pour l'instant, le barrage aval agit comme un mur et nous ne modélisons le comportement fluvial qu'au niveau d'un tronçon RCC-RT. Il serait intéressant de faire des modélisations qui intègrent plusieurs tronçons. Finalement, au fur et à mesure que de nouvelles observations de terrain sont acquises, le modèle empirique de prédiction des distances de transfert va pouvoir être amélioré.

- Un travail intéressant de modélisation morphodynamique a été aussi réalisé dans le cadre de l'OSR5 par le CEREGE. Il serait intéressant de comparer et mettre en rapport les résultats de ce modèle morphodynamique 1D avec les résultats acquis ici concernant le temps de transit du sédiment grossier. Ces deux modèles fournissent deux approches différentes et indépendantes pour s'affranchir de la réponse du lit du Rhône aux opérations de recharge sédimentaire. Tandis que le modèle morphodynamique possède une base physique appuyée sur la théorie morpho-dynamique, le modèle proposé ici a une base plus empirique appuyée sur des observations de terrain. Aussi, les deux modèles fournissent des informations différentes : le modèle morphodynamique apporte une information sur l'évolution verticale du lit, alors que le modèle développé ici permet de répondre à la question de comment se propage le sédiment injecté. Il semble évident que les deux informations sont importantes pour une bonne conception des opérations de recharge sédimentaire et les deux approches doivent être ainsi associées.

6. REFERENCES

- Arnaud F., Piégay H., Schmitt L., Rollet A.J., Ferrier V. et Béal D. (2015). Historical geomorphic analysis (1932–2011) of a by-passed river reach in process-based restoration perspectives: the Old Rhine downstream of the Kembs diversion dam (France, Germany). *Geomorphology*, 236, 163–177.
- Bradley D.N. et Tucker G.E. (2012). Measuring gravel transport and dispersion in a mountain river using passive radio tracers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 1034–1045.
- 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 de l'OSR5 2018-2020. 36 p.
- Church M. et Hassan M.A. (1992). Size and distance of travel of unconstrained clasts on a streambed. *Water Resources Research*, 28, 299–303.
- Dell'Agnese A., Brardinoni F., Toro M., Mao L., Engel M. et Comiti F. (2015). Bedload transport in a formerly glaciated mountain catchment constrained by particle tracking. *Earth Surface Dynamics*, 3, 527–542.
- Dépret T., Piégay H., Cassel M., Noirot B., Vaudor L., Bultingaire L., Yousefi S., Michel K., Dugué V. et Camenen B. (2018). *Mesures et modélisations du fonctionnement hydrosédimentaire du secteur de Miribel-Jonage*. Rapport final, Action 1.2 de l'OSR4 2015-2017. 21 p.
- 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.
- Ferguson R. et Hoey T. (2002). Long-term slowdown of river tracer pebbles: generic models and implications for interpreting short-term tracer studies. *Water Resources Research*, 38, 1142.
- Ferguson R. et Wathen S. (1998). Tracer-pebble movement along a concave river profile: virtual velocity in relation to grain size and shear stress. *Water Resources Research*, 34, 2031–2038.
- 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.
- Liébault F., Bellot H., Chapuis M., Klotz S. et Deschàtres M. (2012). Bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 385–399.
- Malavoi J.R. (2008). *Etude géomorphologique du Rhône en amont de Lyon du pk 34.2 au pk 5.7*. Rapport d'étude, 46 p.
- Milan D.J. (2013). Virtual velocity of tracers in a gravel-bed river using size-based competence duration. *Geomorphology*, 198, 107–114.
- Parrot, E., 2015. Analyse spatio-temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée. Thèse de doctorat de Géographie, Université Lyon 3, 468 p.
- Phillips C.B., Martin R.L. et Jerolmack D.J. (2013). Impulse framework for unsteady flows reveals superdiffusive bed load transport. *Geophysical Research Letters*, 40, 1328–1333.

- Phillips CB. et Jerolmack DJ. (2014). Dynamics and mechanics of bed-load tracer particles. *Earth Surface Dynamics*, 2, 513–530.
- Piton G. et Recking A. (2017). The concept of travelling bedload and its consequences for bedload computation in mountain streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42 (10), 1505-1519.
- Piton G., Vázquez-Tarrío D. et Recking A. (2016). Can bed-load help to validate hydrology studies in mountainous catchment? The case study of the Roize (Voreppe – FR). *E3S Web of Conferences* (Volume 7), 04020, 12.
- Recking A. (2013). Simple method for calculating reach-averaged bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139 (1).
- Recking A. (2016), A generalized threshold model for computing bed load grain size distribution. *Water Resources Research*, 52, 9274– 9289.
- Recking A., Piton G., Vázquez-Tarrío D. et Parker, G. (2016). Quantifying the morphological print of bedload transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41 (6), 806-822.
- Roseberry J. C., Schmeeckle M. W. et Furbish, D. J. (2010). A probabilistic description of the bed load sediment flux: 2. Particle activity and motions. *Journal of Geophysical Research*, 117.
- Schneider J., Turowski J., Rickenmann D., Hegglin R., Arrigo S., Mao L. et Kirchner J. (2014). Scaling relationships between bed load volumes, transport distances, and stream power in steep mountain channels. *Journal of Geophysical Research. Earth Surface*, 119 (3), 533– 549.
- Tal M., Vázquez-Tarrío D., Piégay H., Camenen B. et Atti A. (2018). *Évolutions morphodynamiques sur le long-terme*. Rapport final, Action 1.4 de l'OSR4 2015-2017.
- Vázquez-Tarrío D., Piqué G., Vericat D. et Batalla R. J. (2021). The active layer in gravel-bed rivers: An empirical appraisal. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46: 323– 343.
- Vázquez-Tarrío D., Recking A., Liébault F., Tal M., et Menéndez-Duarte R. (2019a) Particle transport in gravel-bed rivers: Revisiting passive tracer data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44, 112– 128.
- Vázquez-Tarrío D., Tal M., Camenen B. et Piégay H. (2019b). Effects of continuous embankments and successive run-of-the-river dams on bedload transport capacities along the Rhône River, France. *Science of the Total Environment*, 658, 1375– 1389.
- Vázquez-Tarrío D et Batalla RJ. (2019). Assessing controls on the displacement of tracers in gravel-bed rivers. *Water*, 11, 1598.
- Wilcock PR. (1997). Entrainment, displacement, and transport of tracer gravels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 1125– 1138.



Observatoire des Sédiments du Rhône

**Plan
Rhône
Saône**


**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*

**agence
de l'eau**
RHÔNE MÉDITERRANÉE
CORSE
établissement public de l'État

AVEC LE SOUTIEN DE L'UNION EUROPÉENNE


**L'EUROPE S'ENGAGE
pour le Rhône
et la Saône**
avec le FEDER


UNION EUROPÉENNE

CNR

 **EDF**

 **La Région
Occitanie**
Pyrénées - Méditerranée

**RÉGION
SUD**
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR

 **La Région**
Auvergne-Rhône-Alpes

cnrs

EVS
Environnement
Vie Société

 **cerege**
CENTRE EUROPÉEN
DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT
DES GÉOCHIMIES DE L'ENVIRONNEMENT

INRAE

ENTPE
L'école de l'aménagement durable des territoires

IRSN
INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

 **Ifremer**

 **mio**
Mediterranean Institute
of Oceanography

**ZA Zone
Atelier**
LTER FRANCE BASSIN DU RHÔNE

 **Ohm**
Observatoire Hommes-milieux - Vallée du Rhône

**LabEx
DRIHM**

cnrs

**INVESTISSEMENTS
D'AVENIR**

Observatoire des Sédiments du Rhône

GRAIE – OHM Vallée du Rhône

66 bd Niels Bohr – CS 52132

69603 Villeurbanne Cedex

www.graie.org/osr/

Contact :

bertrand.morandi@graie.org