



HAL
open science

Mesure de la charge sableuse

Guillaume Dramais, B. Camenen, Jérôme Le Coz, Adrien Bonnefoy, Mickael Lagouy, Fabien Thollet

► **To cite this version:**

Guillaume Dramais, B. Camenen, Jérôme Le Coz, Adrien Bonnefoy, Mickael Lagouy, et al.. Mesure de la charge sableuse. [Rapport de recherche] INRAE. 2021. hal-03292623

HAL Id: hal-03292623

<https://hal.science/hal-03292623>

Submitted on 20 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
Sédiments
du Rhône

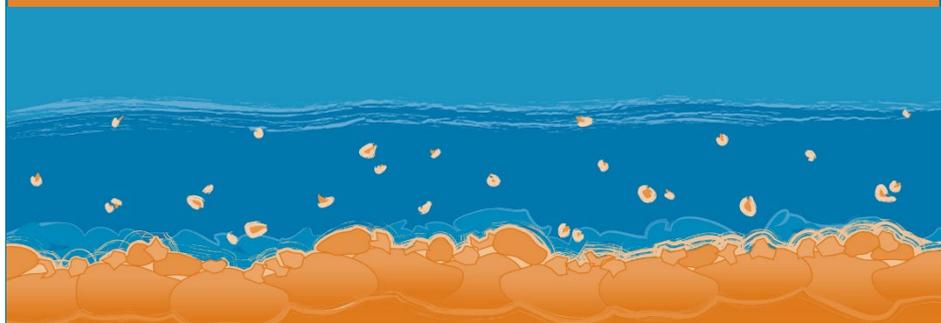
Mesure de la charge sableuse

OSR5 2018-2020

Rapport final



Plan ~
Rhône



Mesure de la charge sableuse

Rapport final – Version du 15 juin 2021

Axe B	Monitoring des flux
Action B3	Le suivi des sables
Sous-Action B3.2	Actions sable – morphologie locale

Personnes impliquées	Equipe de recherche
Guillaume Dramais Benoît Camenen Jérôme Le Coz Adrien Bonnefoy Mickaël Lagouy Fabien Thollet	Hydraulique des rivières, RiverLY, INRAE

Pour citer ce document :

Dramais G., Camenen B., Le Coz J., Bonnefoy A., Lagouy M., Thollet F. (2021). *Mesure de la charge sableuse*. Rapport Final. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 5^{ème} Programme d'Actions, 71 p.

Résumé

Sont présentés dans ce rapport des résultats développés en 2020 dans le cadre de la thèse de Guillaume Dramais (2016-2020). Le début de ce rapport donne des indices détaillés de la présence de sable sur différents tronçons du Rhône français à travers la présentation et l'interprétation des résultats de différentes campagnes de mesures effectuées ces dernières années. Parmi ces mesures, des jaugeages de sable en suspension ont été réalisés à Lyon Perrache entre décembre 2017 et mars 2020, ils mettent en évidence la présence de sable en suspension dans le Rhône à Lyon.

Ensuite des courbes de tarage de sable en suspension sont testées et mises en oeuvre sur le Rhône à Lyon Perrache. Elles permettent de relier les flux de sable en suspension à d'autres variables mesurées dans le cours d'eau, en particulier le débit liquide. L'utilisation d'une courbe de tarage de sable en suspension va ainsi permettre une première évaluation des flux de sables sur le Rhône à Lyon Perrache en janvier 2018 suite à deux crues significatives.

Il est nécessaire pour généraliser cette approche de mettre en oeuvre une stratégie de mesures régulières des flux de sable par jaugeage solides. Elle peut permettre de mieux cerner les apports et la fréquence nécessaire pour un suivi opérationnel.

Mots-clés

OSR ; Rhône ; sable ; courbe de tarage ; bilan de flux ; incertitudes

Table des matières

1	Introduction	1
2	Synthèse des sites et observations des flux de sable en suspension sur le Rhône	3
2.1	Particularités du Rhône et de certains de ses affluents	3
2.1.1	La rencontre de L'Arve et du Rhône	4
2.1.2	Barrage de Génissiat	6
2.1.3	Champagneux	7
2.1.4	De la rivière d'Ain à Jons	8
2.1.5	Secteur de Miribel Jonage	9
2.1.6	Le Rhône à Lyon	10
2.1.7	Confluence Isère-Rhône	11
2.1.8	Delta du Rhône	13
2.2	Y-a-t-il du sable en suspension dans le Rhône ?	15
2.2.1	Le sable du Rhône	15
2.2.2	Mesures sur l'Arve et le Haut-Rhône	16
2.2.3	Mesures sur le Rhône à Lyon Perrache lors des crues de janvier 2018	23
2.2.4	Mesures sur le Bas-Rhône	35
3	Calcul d'un premier bilan de flux de sable en suspension lors d'une crue du Rhône à Lyon Perrache	43
3.1	Courbes de tarage sédimentaires	43
3.1.1	Relations directes entre concentration et débit	44
3.1.2	Établissement d'une relation simple sur le Rhône à Lyon Perrache	46
3.2	Courbe de capacité de transport	48
3.2.1	Méthodologie pour l'établissement d'une courbe de tarage sédimentaire par capacité	49
3.2.2	Application au Rhône à Lyon Perrache	49
3.3	Établissement d'une courbe de tarage sédimentaire avec incertitudes	52
3.3.1	Expression du modèle de débit de sable en suspension	52
3.3.2	Expression d'une courbe de tarage de sable en suspension sans base physique	52
3.3.3	Expression d'une courbe de tarage de sable en suspension avec base physique	54
3.4	Bilan de flux sur le Rhône à Lyon Perrache	59
4	Conclusion	61
4.1	Conclusion générale	61
4.2	Des courbes de tarage par capacité aux bilans de flux de sable sur le Rhône	62
4.3	Perspectives sur la mesure de la charge sableuse sur le Rhône	63

A Bibliographie

65

1 Introduction

La première partie de ce rapport donne des indices détaillés de la présence de sable sur différents tronçons du Rhône français à travers la présentation et l'interprétation des résultats de différentes campagnes de mesures. Dans la seconde partie de ce rapport, des courbes de tarage de sable en suspension sont testées et appliquées sur le cas du Rhône à Lyon Perrache pour estimer des bilan de flux de sable en suspension.

Si le débit du Rhône est mesuré depuis longtemps en continu, le transport solide n'a pas été l'objet d'un suivi aussi régulier et organisé. Le Plan Rhône a permis de financer des études, de rassembler les connaissances et de décrire le fonctionnement hydrosédimentaire du fleuve. Aujourd'hui l'OSR, permet de coordonner les efforts de recherche et les enjeux environnementaux et industriels liés aux sédiments du Rhône. L'OSR a tissé un réseau de stations turbidimétriques et de sites de prélèvement pour évaluer les flux de MES et de polluants associés. Si on s'accorde à dire que le Rhône constitue l'apport principal de matières solides à la Méditerranée (UNEP/MAP/MED, 2003), les estimations des apports annuels de particules fines ($\approx < 63 \mu\text{m}$) sont très variables (cf. Tableau 1.1).

Période	Bilan [Mt/an]	Auteur
1809-1837	27	Surell (1847)
Début du xx ^e siècle	25 à 30	Pardé (1925)
1961-1996	6.8 à 11.8	Antonelli (2002)
1967-1993	7.4	Pont <i>et al.</i> (2002)
2000-2012	19.5	Zebracki <i>et al.</i> (2015)
1977-2013	8.4	Sadaoui <i>et al.</i> (2016)
2000-2016	6.6	Poulier <i>et al.</i> (2019)

TABLE 1.1. Quelques estimations des bilans de flux de MES sur le Rhône à Beaucaire.

Cette variabilité s'explique par l'utilisation de différentes méthodes de calcul, d'analyses, de reconstruction des chroniques et par la prise en compte de séries de mesures aux résolutions et incertitudes différentes. Si on revient aux estimations de la période pré-barrage, les estimations de Surell (1847) ou Pardé (1925) sont beaucoup plus fortes que les estimations post-aménagement, sachant que les estimations anciennes prennent en compte le sable dans les analyses de la suspension. Dans les estimations récentes sur le Rhône, le sable en suspension n'est pas pris en compte spécifiquement. Dans la plupart des cas, il est considéré comme négligeable en quantité et aucune

séparation n'est réalisée lors des analyses. Cette approximation peut engendrer des erreurs importantes (Dramais *et al.*, 2018a).

Les différentes typologies de crues plus ou moins érosives et la géologie des bassins des affluents du Rhône vont entraîner une grande variabilité de réactions en terme de transport solide sur le Rhône. L'étude de Sogreah (2000b) dans le cadre de l'Etude Globale Rhône indiquait que les concentrations pouvaient varier de 1 à 100 d'une crue à l'autre pour un même débit, cette variabilité peut s'expliquer par différents facteurs et notamment en fonction des apports de particules plus grosses comme le sable. Suite à une réflexion initiée en 2013 entre CNR, EDF, l'OSR et la DREAL sur le suivi de l'ensablement de la confluence Isère-Rhône, le besoin d'un suivi des flux de sable a émergé. Depuis le programme OSR4 (2015-2017) le transport de sable est devenu l'un des axes de recherche financé de l'OSR avec l'objectif d'avoir une vision intégrée du sable à l'échelle du bassin versant.

Ce rapport fait une synthèse de différentes campagnes d'observation réalisées sur le Rhône ces dernières années pour étudier la présence de sable et sa dynamique. Les campagnes de mesure spécifiques à l'OSR5 sont résumées dans la figure 1.2, avec le 24 janvier 2018 l'un des plus gros débit mesuré à l'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) sur le Rhône à Lyon. Chacune de ces campagnes de mesure a consisté à réaliser un jaugeage solide en combinant des mesures ADCP et des prélèvements distribués dans la section à l'aide d'une bouteille horizontale. Les échantillons ont été analysés en suivant la méthode de séparation du sable par tamisage décrite notamment dans Dramais *et al.* (2018a). Les crues exceptionnelles de janvier 2018 à Lyon ont été l'évènement principal étudié pour l'action B3.2 du programme OSR5.

Date	Site	Débit liquide [m ³ /s]
13 décembre 2017	Lyon Perrache	1479
05 janvier 2018 (matin)	Lyon Perrache	2190
05 janvier 2018 (ap. midi)	Lyon Perrache	2220
06 janvier 2018	Bourg-Les-Valence	4600
22 janvier 2018	Lyon Perrache	2002
23 janvier 2018	Lyon Perrache	2647
24 janvier 2018	Lyon Perrache	2744
25 janvier 2018	Lyon Perrache	2152
12 juin 2018	Lyon Perrache	856
06 mars 2020	Lyon Perrache	1783

TABLE 1.2. Campagnes réalisées dans le cadre de l'OSR 5 pour la mesure de la charge sableuse en suspension dans le Rhône à Lyon Perrache et Bourg-Les-Valence.

Synthèse des sites et observations des flux de sable en suspension sur le Rhône

2.1 Particularités du Rhône et de certains de ses affluents

Dans cette partie, nous allons décrire quelques particularités de sites du bassin du Rhône qui ont fait l'objet de campagnes de mesures ces dernières années dans le cadre de l'OSR. Les équipes de terrain de INRAE et du CACOH (CNR) ont permis l'acquisition des données (cf. Figure 2.13 a et b) et peuvent intervenir *in-situ* dans la plupart des situations. Les données exploitées par la suite, sont issues de mesures coordonnées entre INRAE et CNR. Les données des campagnes de mesures de Lyon Perrache sont exploitées dans la seconde partie de ce rapport. Certains sites potentiellement importants au niveau du transport du sable comme la Durance ou la Saône ne sont pas évoqués, car aucune campagne dédiée sur ces cours d'eau n'a été réalisée pour l'instant dans le cadre de l'action sable de l'OSR. Mais ils sont potentiellement des contributeurs non négligeables.

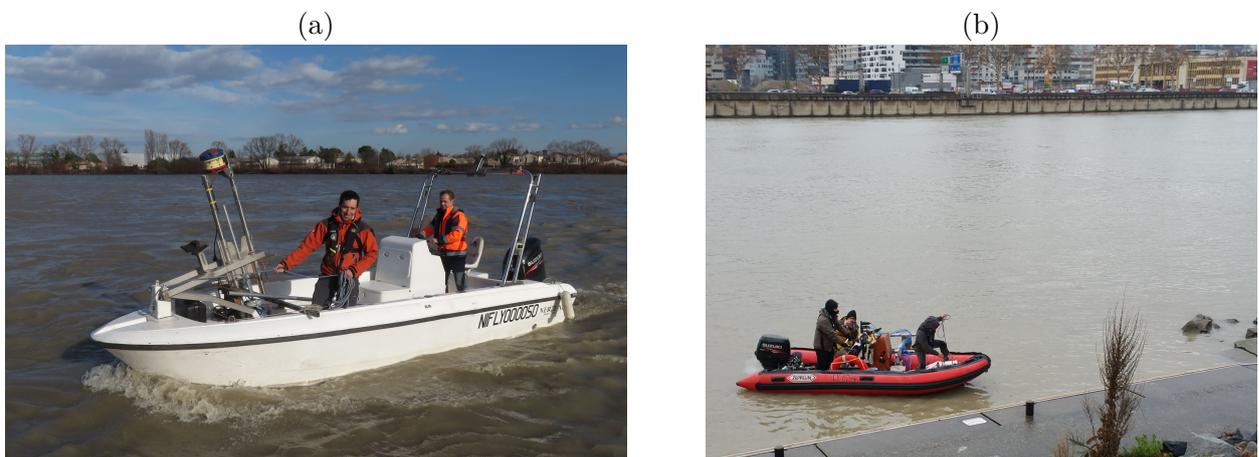


FIGURE 2.1. Vedette de mesures de la CNR sur le Rhône en amont de la confluence avec l'Isère en janvier 2018 (Photo A. Vergne - INRAE) (a). Campagne de mesures hydro-sédimentaires sur le Rhône à Perrache en janvier 2018 (b).

Ce sont ces campagnes (cf. Tableau 2.1) qui ont permis de mettre en évidence la présence de sable en suspension sur différents secteurs du Rhône en période de hautes eaux. Plusieurs cours d'eau contribuent à la recharge en sable sur le Rhône : l'Arve, l'Ain, l'Isère sont clairement identifiés.

D'autres n'ont pas encore fait l'objet de suivi spécifique du sable en suspension mais contribuent également dans différentes proportions suivant les événements hydrologiques.

Sites de mesure	Date	Objectif - Moyens déployés
Ripes	mai 2016	Suivi des flux entrants dans Génissiat (ADCP et préleveur OFEV depuis une trille téléphérique)
Bognes	mai 2016	Suivi des flux sortants de Génissiat (ADCP et préleveur P72 depuis une trille téléphérique)
Champagneux	mai 2016	Suivi des flux par jaugeage solide (ADCP, Aquascat et bouteille horizontale depuis un bateau)
Lyon	2017-2020	Neuf jaugeages solides (ADCP et bouteille horizontale depuis un bateau)
Bourg-les-Valences	mai 2015	Exploration des concentrations et débits de l'Isère et du Rhône (ADCP, Aquascat et bouteille horizontale depuis un bateau)
Bourg-les-Valences	janvier 2018	Exploration des concentrations et débits de l'Isère et du Rhône (ADCP et bouteille horizontale depuis un bateau)
Port-Saint-Louis	novembre 2016	Exploration des concentrations et débits du Rhône (ADCP et bouteille horizontale depuis un bateau)

TABLE 2.1. Campagnes de mesures réalisées sur le bassin du Rhône qui ont été exploitées dans ce travail.

2.1.1 La rencontre de L'Arve et du Rhône

Située à 4,5 km en amont de la “Jonction” avec le Rhône (cf. Figure 2.2 a), la station hydro-sédimentaire du “Bout du Monde” sur l'Arve est exploitée par l'OFEV (station 2170). L'Arve est le principal pourvoyeur de sédiments du Haut Rhône (Launay *et al.*, 2019a), c'est une rivière alpine au régime nival (Bravard, 1987). Des extractions de matériaux ont longtemps eu lieu sur l'Arve, provoquant une diminution importante des apports de sédiments grossiers. Les graviers charriés par l'Arve sont actuellement déposés en grande partie dans le cours d'eau en amont de Genève ; une large partie des sédiments en suspension de l'Arve, en particulier des sables, se déposent dans les retenues de Verbois et Chancy Pougny sur le Rhône (Loizeau et Wildi, 2007). Ces dépôts entraînent une hausse de la ligne d'eau et une menace potentielle d'aggravation des inondations des bas quartiers de Genève.



FIGURE 2.2. Confluence de l'Arve et du Rhône pendant une crue de l'Arve (janvier 2018) (Photo M. Lagouy - INRAE) (a). Barrage de Verbois lors de l'APAVER en mai 2016 (Photo E. Henry - INRAE) (b).

Construite en 1942, la retenue de Verbois (cf. Figure 2.2 b) est soumise régulièrement depuis 1965 à une vidange (abaissement du niveau) accompagnée d'une chasse qui permet l'évacuation des sédiments. Le barrage de Chancy-Pougny ne forme pas de retenue, c'est un barrage au fil de l'eau mais il subit tout de même des dépôts des sédiments de l'Arve qui transitent par Verbois. Les dernières APAVER et leur accompagnement par la CNR ont fait l'objet de campagnes de mesures de l'OSR notamment après la jonction, à la station de Ripes de l'OFEV (station 2174). Cette station est située côté suisse du Rhône en rive gauche quelques centaines de mètres en aval du barrage usine de Chancy-Pougny. Cette station est équipée d'une trille motorisée permettant de déployer des moulinets hydrométriques sur poids de type saumon ou autres instruments de prélèvement ou de mesure. Un kilomètre en aval sur la rive droite se trouve la station CNR de Pougny où sont mesurés la turbidité et le débit entrant dans la retenue de Génissiat (cf. Figure 2.3).

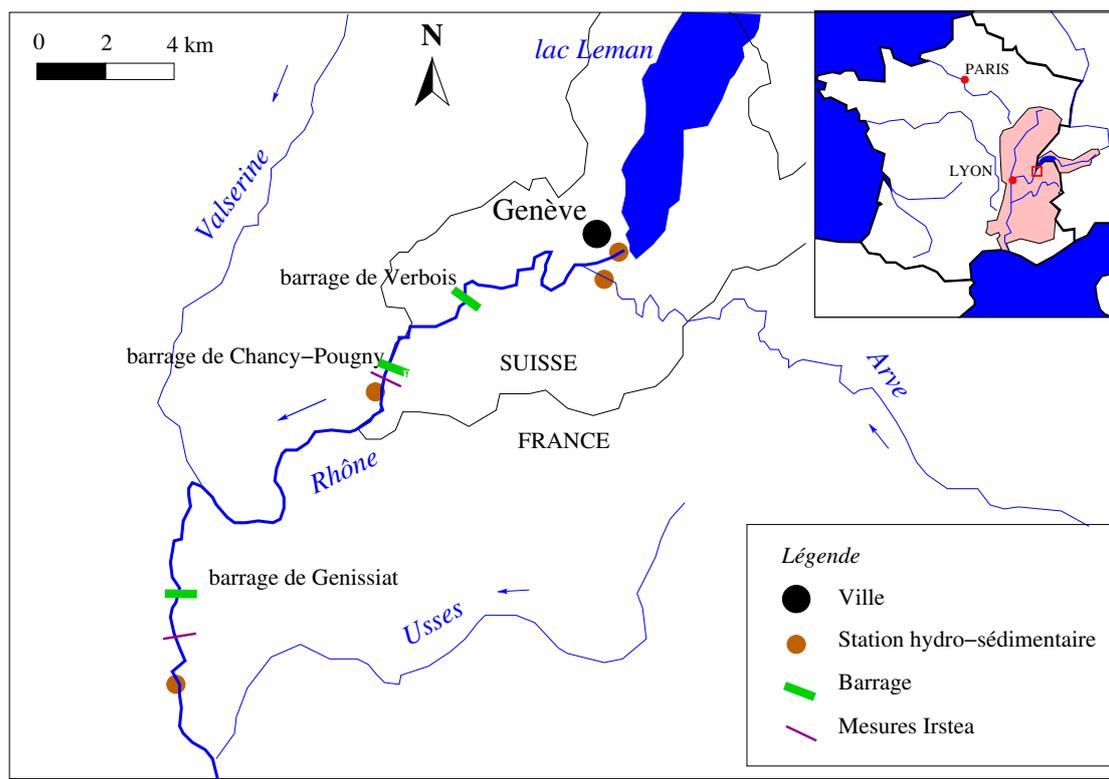


FIGURE 2.3. Carte de la zone d'étude du Haut Rhône (carte : B. Camenen).

2.1.2 Barrage de Génissiat

Le barrage de Génissiat (cf. Figure 2.4 a) est un barrage poids avec une hauteur maximale de chute de 67 m. Sa retenue s'étend sur 23 km. Il est équipé d'un évacuateur de surface, d'une vanne de demi-fond et d'une vanne de fond, l'ensemble des évacuateurs a été conçu pour débiter $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$. La vanne de fond a été mise en place dans le but d'abaisser au maximum le plan d'eau pour l'inspection des ouvrages ou pour opérer des chasses de fond et favoriser le transit des sédiments. L'évacuateur de surface déverse de l'eau moins chargée. Le barrage de Génissiat joue un rôle primordial dans les APAVER avec deux objectifs : faire transiter le maximum de sédiments vers l'aval et assurer une dilution optimale des écoulements chargés pour préserver le milieu et les usages (Bravard et Clémens, 2008). Guertault (2015) retrace l'historique des différents événements de chasse de Génissiat (APAVER) et leurs impacts principaux. Vingt opérations de ce type ont eu lieu avec différents impacts comme la catastrophe écologique de 1978 (disparition quasi totale des salmonidés jusqu'à Lyon) ou encore l'envasement massif de la retenue en 1981 (Guertault, 2015). Ces événements ont conduit à la mise en place d'un protocole de gestion des retenues permettant de limiter le dépôt dans la retenue de Génissiat, tout en maintenant à l'aval des concentrations acceptables pour le milieu aquatique.

Un tri granulométrique avec un affinement des sédiments d'amont en aval est observé dans les dépôts de la retenue, les sables sont majoritaires entre les PK 178 et 170,5 (Guertault, 2015). Des mesures sont réalisées systématiquement à l'aval du barrage. Les sables en suspension ont été mesurés à plusieurs reprises, à la trille téléphérique de Bognes qui permettait le déploiement d'appareils de mesures (cf. Figure 2.4 b). La station de Bognes est située en rive droite du Rhône, quelques

centaines de mètres en aval du barrage de Génissiat (le câble téléphérique a malheureusement été démonté en 2019).



FIGURE 2.4. Barrage de Génissiat vue de l'aval (2010) (a). Mesures ADCP pendant l'APAVÉR en mai 2016 depuis la trille téléphérique de Bognes (b).

2.1.3 Champagneux

Le secteur de Champagneux est situé en amont du barrage de Bregnier-Cordon exploité par la CNR. Ce tronçon est étudié précisément par les équipes d'ingénierie de la CNR qui ont établi un modèle hydro-sédimentaire du secteur. Une station provisoire pour la mesure des MES a été installée pendant l'APAVÉR 2016 par la CNR. Des échantillonnages et mesures hydroacoustiques ont été réalisées depuis des barques de mesure sur plusieurs transects (cf. Figure 2.5 a et b).

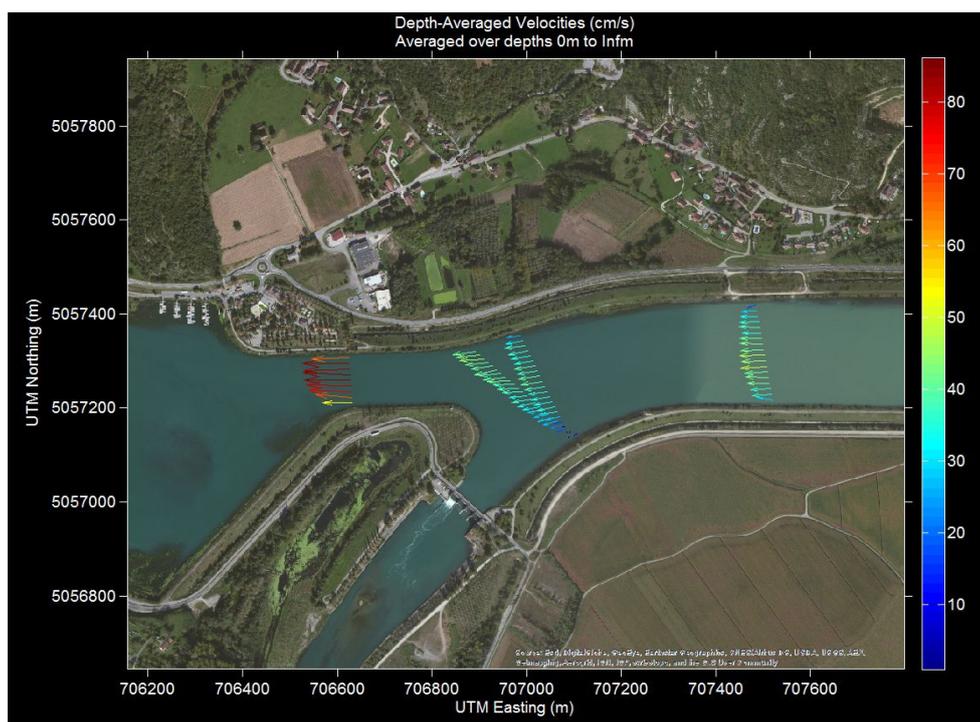


FIGURE 2.5. Localisation des transects explorés par ADCP à Champagnieux en mai 2016 avec les données ADCP moyennées sur la verticale grâce au logiciel VMT (a) (photo Géoportail).

2.1.4 De la rivière d'Ain à Jons

La rivière d'Ain prend sa source dans le Jura sur le plateau de Nozeroy et se jette dans le Rhône au terme d'un parcours de près de 200 km (cf. Figure 2.9 a et 2.6 b). C'est l'affluent le plus important du Haut-Rhône français en terme de débit liquide, d'un régime pluvio-nival. Son module à Chazey-sur-Ain est de $123 \text{ m}^3/\text{s}$.



FIGURE 2.6. Dépôt de sable sur la rive droite de Port-Galland sur l'Ain en février 2018 (a). Campagne de mesures hydro-sédimentaire dans la lône de Port Galland sur l'Ain en avril 2005 (b).

Si la charge en suspension (MES) de l'Ain est relativement modeste, elle reste peu connue pour le mode sableux. Il semble que le transport ait été plus fort dans le passé comme pourrait l'attester des éléments historiques (en particulier l'état des versants du Jura au XIX^e siècle et le fait que les dépôts sableux post-crues étaient alors fréquents) (Sogreah, 2000a). De tels dépôts sont encore parfois constatés (cf. Figure 2.6 a et 2.29). Les apports de l'Ain et une recharge sédimentaire dans les terrasses Würmienne favorisent une forte activité en amont de Lyon associée à une forte pente de 0,06 à 0,08%. La charge grossière apportée par l'Ain au Rhône a été estimée entre 18 000 et 30 000 m³/an (Rollet, 2007) et réévaluée plus récemment à la hausse avec 40 000 m³/an par Artelia (2012). Le tronçon du Rhône entre la confluence avec l'Ain et le secteur de Miribel-Jonage est ainsi un des rares tronçons du Haut-Rhône avec un transport solide grossier conséquent.

2.1.5 Secteur de Miribel Jonage

Le barrage de Jons (69) se situe à la diffifluence entre le canal de Miribel et le canal de Jonage, il permet la répartition des débits entre ces deux bras (cf. Figure 2.7 a). Une station de mesure est installée à la pointe de la diffifluence en rive droite du canal de Jonage (cf. Figure 2.9 a). Cette station d'alerte a été mise en place par la communauté urbaine de Lyon dans les années 1980 pour prévenir de la contamination par pollution des champs captants de Crépieux et Charmy qui produisent de 300 000 à 550 000 m³ d'eau potable par jour (Burgeap, 2018). L'une des particularités de la station est que la plupart des capteurs ne sont pas en contact direct avec la rivière mais déportés dans un local dédié, alimenté par un système de pompage qui distribue l'eau sur les différents analyseurs. Parmi le panel de capteurs en place, un capteur de turbidité permet le suivi en continu des concentrations en MES, la maintenance du capteur est assurée par le Grand-Lyon. La courbe de calibration est largement documentée et contrôlée à chaque passage sur site par le biais d'analyses de MES sur des échantillons prélevés manuellement.

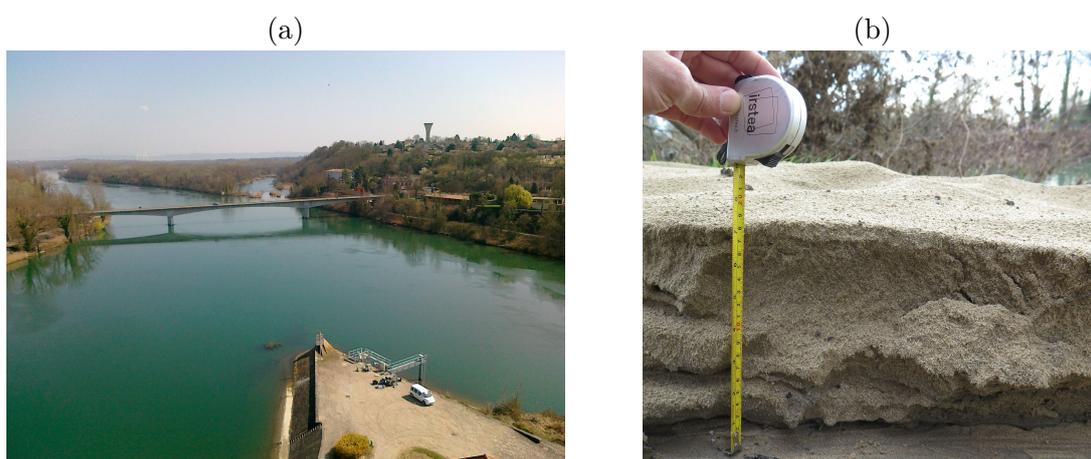


FIGURE 2.7. Diffifluence du Rhône à Jons et station d'alerte du Grand Lyon, 2012 (a). Dépôt de sable sur la rive droite du canal de Miribel en février 2018 (b).

Le Rhône a subi de nombreux aménagements et bouleversements morphologiques dans ce secteur, notamment depuis la fin du XIX^e siècle pour lutter contre les inondations avec la construction du canal de Miribel, de l'aménagement hydroélectrique de Cusset (cf. Figure 2.8). Ces aménagements ont provoqué un basculement du profil en long du lit du canal de Miribel, avec enfoncement

du fond de plus de quatre mètres en amont et engrèvement du lit en aval (Gilles *et al.*, 2018). L'incision du canal s'est poursuivie durant le xx^e siècle avec les extractions de matériaux. Depuis l'arrêt des extractions en 1992, le canal de Miribel bénéficie d'un réajustement progressif du profil en long de son lit.

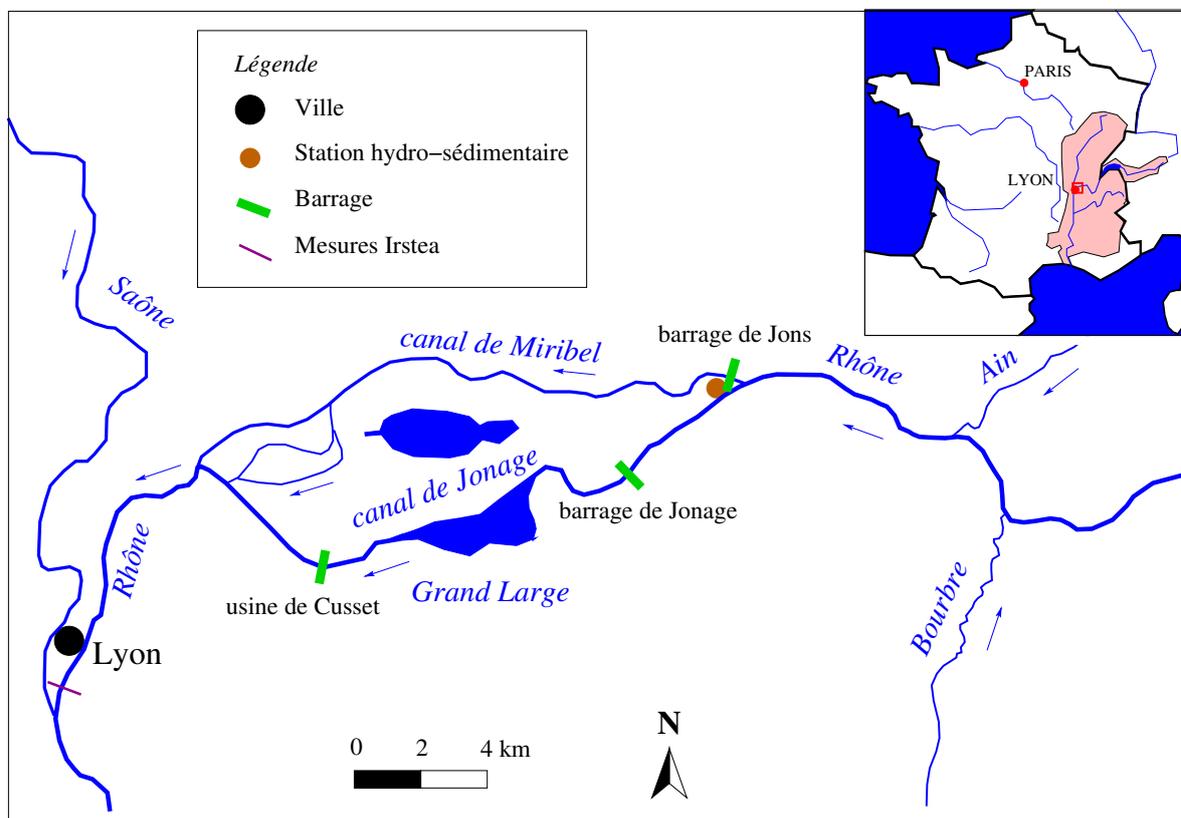


FIGURE 2.8. Carte de la zone d'étude autour de Lyon (carte : B. Camenen).

Le tronçon de Miribel est caractérisé par un transport de la charge de fond encore très actif avec d'importants dépôts de graviers. Sur la période 2006-2011, il apparaît que le maintien d'un stock sédimentaire important en provenance de l'Ain a permis une alimentation solide du canal de Miribel entraînant le maintien ou l'exhaussement des fonds de ce canal. Une quantité importante de sédiments grossiers s'accumule en effet dans la fosse en aval du seuil de Villeurbanne. Cette zone sensible est l'objet d'un suivi régulier pour optimiser le fonctionnement des champs captants de Crépieux et Charmy en préservant notamment de l'engrèvement le Vieux Rhône de Neyron (Artelia, 2012).

2.1.6 Le Rhône à Lyon

Le Rhône réuni traverse ensuite la ville de Lyon (cf. Figure 2.9 a). Des digues de protection ont été construites dans la ville au xix^e siècle. Une station hydrométrique de la CNR a été implantée sur le tronçon du Rhône au niveau de la gare de Perrache en amont de la confluence avec la Saône. Le module inter-annuel du Rhône à Perrache est de 600 m³/s.

La rive gauche du Rhône à Lyon est soumise à un ensablement régulier qui nécessite des travaux d'entretien (CNR, 1989, 1991; Grand Lyon, 2017). En 1987, l'État a concédé une grande partie des

berges du Rhône en rive gauche (entre le pont De Lattre de Tassigny et le pont Pasteur) pour leur utilisation, leur mise en valeur et en vue de la création d'une zone portuaire. Dès l'année suivante, des problèmes d'ensablement et d'échouage des péniches amarrées dans le secteur apparaissent (cf. Figure 2.9). Depuis, des dragages sont effectués régulièrement $\approx 1\,400\text{ m}^3/\text{an}$ depuis 1989 avec un maximum de $9\,900\text{ m}^3$ en 1994. Durant la période 1989-1996, de gros volumes ont été dragués. Pendant cette période, l'Ain a été très actif, avec notamment une crue exceptionnelle atteignant plus de $1\,100\text{ m}^3/\text{s}$ à Pont-d'Ain en février 1990, il se peut que les dépôts observés soient liés à cette activité de l'Ain. En aval de Lyon, le Rhône, grossi par les eaux de la Saône, est régulé par l'aménagement de Pierre-Bénite-Saint-Font, mis en service en 1967.



FIGURE 2.9. Mise à l'épreuve des amarrages pour les péniches lyonnaises pendant la crue de janvier 2018 (photo R. André - Grand Lyon).

Plusieurs campagnes de mesures hydro-sédimentaires ont été réalisées dans ce secteur, de 2017 à 2020 notamment pendant la crue quasi-décennale de janvier 2018 (cf. Figure 2.9 b).

2.1.7 Confluence Isère-Rhône

Maurice Pardé écrivait de l'Isère : “Abondant cours d'eau alpestre, il est soumis avant tout à l'influence nivale et son courant rapide figure parmi les plus formidables transporteurs de boue de l'hydrologie européenne” (Le régime du Rhône, 1925).

L'Isère prend sa source au glacier des sources de l'Isère et rejoint le Rhône après 286 km à la Roche-de-Glun (cf. Figure 2.11 a). L'Isère présente des fluctuations saisonnières de débit assez importantes et typiques d'un régime nival avec des crues de printemps importantes. Le module de la rivière à Beaumont-Monteux (cf. Figure 2.10 b) est de $333\text{ m}^3/\text{s}$. Le bassin versant de l'Isère est l'un des plus équipé de barrages en France. La chaîne de barrages hydro-électriques de la Basse-Isère et la gestion des chasses fait l'objet d'un suivi particulier d'EDF de la CNR et de l'OSR afin d'évaluer leur impact et les volumes de sable qui transitent lors de ces événements.



FIGURE 2.10. Dépôts amont au barrage de Beaumont-Monteux en 2015.

La concentration en MES est suivie en continu, à Beaumont-Monteux notamment, par une station hydro-sédimentaire couplant un turbidimètre optique et des prélèvements réguliers. La contribution de l'Isère en terme de flux de MES au Rhône est de 1,64 Mt/an (période 2000-2016) (OSR 4, 2018). Les chasses des barrages de la Basse-Isère sont déclenchées réglementairement lors de dépassements de seuils de débit de crue de l'Isère. Ces événements ont entraîné à plusieurs reprises, à la décrue, de vastes dépôts de sable qui ont nécessité de nombreux travaux d'entretien (Sogreah, 2000a). La gestion des crues et des chasses de l'Isère à la confluence est une opération complexe pendant laquelle la CNR doit ajuster le fonctionnement de l'usine de Bourg-Les-Valence en fonction du débit du Rhône amont, de celui de l'Isère et des possibilités de décharge via le "barrage Isère" qui sert à détourner le surplus d'eau dans le tronçon court-circuité du Rhône (cf. 2.11).

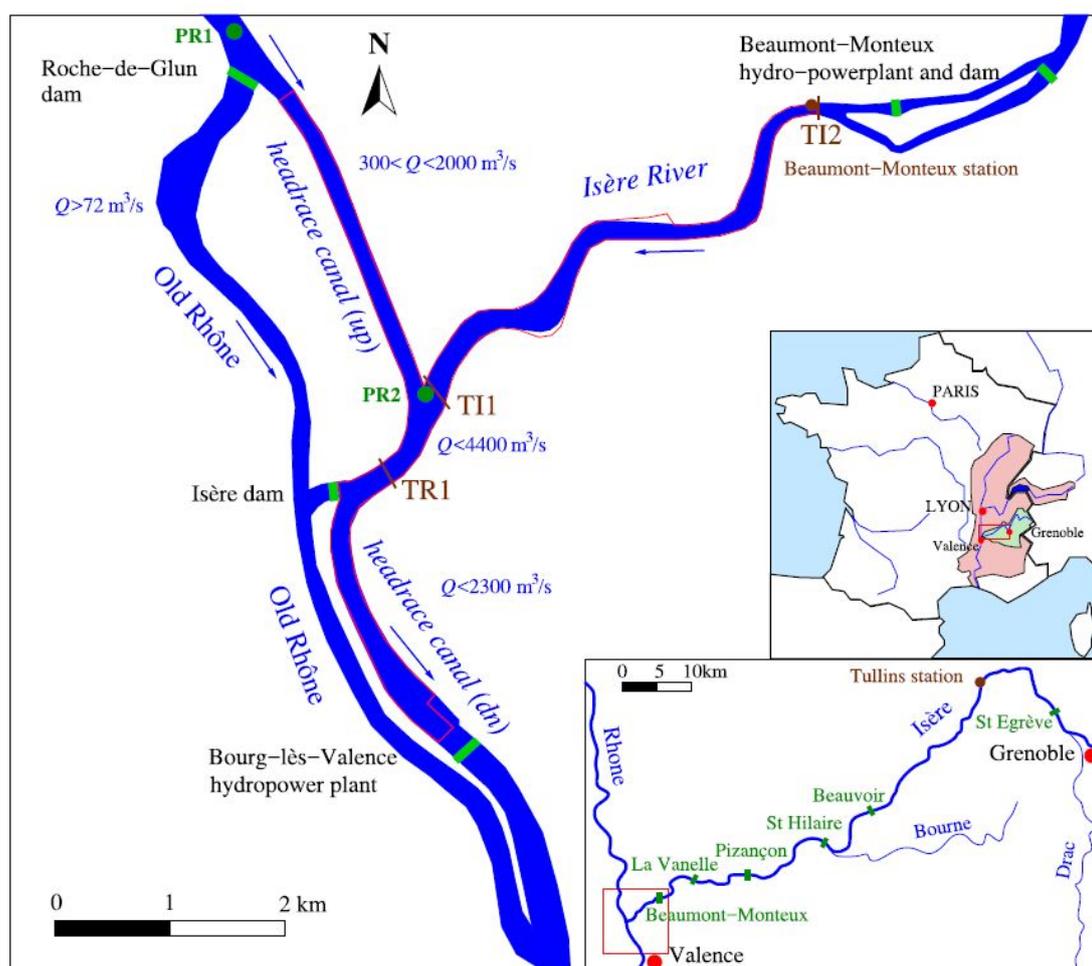


FIGURE 2.11. Carte de la zone d'étude sur l'Isère (carte : B. Camenen).

En 2008, la chasse Isère aurait produit 7,6 Mt de sédiments en suspension (Launay *et al.*, 2019a). Suite à plusieurs campagnes de mesures, notamment pendant les crues de 2015 et 2018, Naudet *et al.* (2016); Camenen *et al.* (2019b) font état de la présence de suspension graduée de sable dans des proportions importantes, quelques exemples de mesures de ces deux campagnes sont présentés dans le § 2.2.4.

2.1.8 Delta du Rhône

Sur le bas Rhône, les principaux ouvrages d'aménagement ont été édifiés entre la fin du XIX^e siècle et le milieu du XX^e siècle. Ce sont les digues de protection contre les inondations et les ouvrages destinés à favoriser l'auto-curage du chenal, afin de développer la navigation fluviale (digues immergées, casiers Girardon). Désormais endigué, le delta du Rhône est figé. Le Rhône en Arles se divise en deux, le Grand Rhône à l'est amène 85 à 90 % du débit à la mer par le Grau Roustan. Le Petit Rhône à l'Ouest rejoint la mer par le Grau d'Orgon (Antonelli *et al.*, 2004). Ces deux bras enserrant la Camargue, espace naturel emblématique de l'embouchure du Rhône (cf. Figure 2.12). C'est dans le delta que l'on observe la transition entre galet et sable dans le lit du Rhône (cf. § 2.2.1). Le delta du Rhône connaît une dégradation de son littoral depuis plusieurs décennies, des études ont lieu pour mieux comprendre les phénomènes d'érosion et de recharge sédimentaire. Le système est très

complexe avec des interactions entre le fleuve et la mer, plusieurs approches parfois combinées ont permis de progresser sur ce sujet notamment par modélisation (Boudet, 2017), études diachroniques de bathymétrie (Sabatier *et al.*, 2006; Raccasi, 2008) ou des carottages avec datation (Vella *et al.*, 2005). Une étude des flux de sable en suspension pourrait permettre d'affiner la connaissance sur la dynamique sédimentaire du delta.

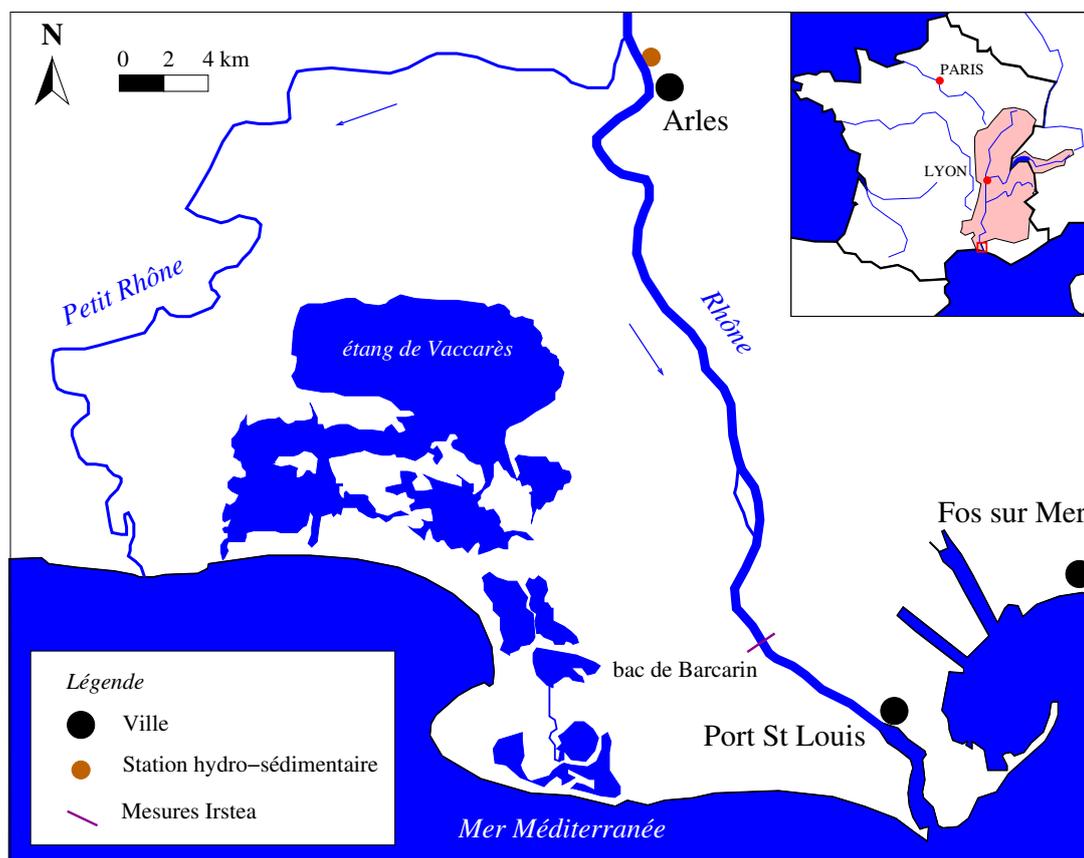


FIGURE 2.12. Carte de la zone d'étude du delta (carte : B. Camenen).

Des suivis fins, adaptés à la quantification des flux dissouts, des flux particuliers et polluants associés, ont été mis en place au niveau de la Station Observatoire du Rhône en Arles (SORA) depuis 2002 sur le Grand Rhône. La SORA gérée par l'IRSN avec le soutien technique de l'Institut Méditerranéen d'Océanologie, est installée dans les locaux des Voies Navigables de France (VNF) en rive droite. La mise à disposition par la CNR des données de débits liquides, acquises quotidiennement, rend possible l'échantillonnage et le calcul des flux de MES. À 13 km en amont de l'embouchure, le bac de Barcarin relie les deux rives du Grand Rhône. La charge en suspension, transite pour 80% lors des crues (Pont *et al.*, 2002). Antonelli (2002) a démontré l'apparition d'une stratification des concentrations dans le flux en suspension à partir de 2 500 m³/s dans le Grand Rhône au niveau des Pk 295 et 324, à partir de prélèvements réalisés avec la bouteille horizontale durant 9 campagnes de mesures. Deux campagnes de mesures des flux de sable en suspension ont été menées à Port-Saint-Louis-du-Rhône et au niveau du bac de Barcarin pendant une crue d'hiver en 2016 (cf. Figure 2.13).



FIGURE 2.13. Houle pendant une crue du Rhône à Port-Saint-Louis-du-Rhône en novembre 2016 (b).

2.2 Y-a-t-il du sable en suspension dans le Rhône ?

Cette dernière partie donne des indices détaillés de la présence de sable sur différents tronçons du Rhône français ces dernières années au cours de différentes campagnes de mesures.

2.2.1 Le sable du Rhône

“Au début de ce siècle, un maître marinier s’était spécialisé dans l’extraction du sable ; il commença en 1911 par draguer le bras de Vaulx-en-Velin, reprit son activité après la guerre puis se déplaça à Villebois en 1925 ; la nature sableuse des fonds devait lui être plus favorable sur ce tronçon où il obtint une autorisation pour dix mille mètres cubes en 5 ans. Cet entrepreneur livrait la marchandise aux verreries de la Loire” rapporte [Bravard \(1987\)](#) dans sa thèse sur le Rhône. Le sable était effectivement présent en quantité dans les lits mineur et majeur du Rhône, notamment dans la région de Lyon. L’étude de [Roignot \(1970\)](#) fait un inventaire des volumes de sable et graviers disponibles dans le lit du Rhône et de ses affluents dans la région lyonnaise, dans le cadre d’une évaluation de la ressource. A l’époque, on cherchait de nouvelles zones d’extraction de matériaux alluvionnaires. Les réserves estimées à l’époque étaient importantes (neuf milliards de m³) réparties entre les cours d’eau (Saône, Rhône, Ain) et leurs lits majeurs.

Dans cette partie sont rassemblées les données expérimentales qui ont été acquises ces dernières années dans le cadre de différents projets. Ces campagnes de mesures ont permis d’affiner le protocole présenté dans le début de ce chapitre, les méthodes d’analyse des sédiments et la méthode de calcul du flux de sable. Ces premières mesures sont exploratoires et n’ont pas toujours permis de calculer des flux mais elles ont permis de mieux dimensionner le suivi de la crue du Rhône à Lyon Perrache en 2018 qui est central dans ce travail. Chacune de ces campagnes a permis de mettre en évidence la présence de sable en suspension sur différents tronçons du Rhône.

Le sable est encore présent dans le Rhône et pose des difficultés de gestion comme l’ensablement de certaines écluses, vannes de fond, ou ports fluviaux. S’il est disponible par endroit, le sable n’est pas pour autant mobilisé en permanence par l’écoulement. Il est peu présent dans le lit du Rhône,

plutôt constitué de graviers et galets. La thèse de [Parrot \(2015\)](#) a montré que la variabilité spatiale de la taille des grains dans le lit du Rhône ne suit pas le schéma classique de tri granulométrique décroissant amont-aval. A l'inverse, les données montrent que la taille médiane des sédiments augmente et que le pavage du lit devient plus important depuis le Haut-Rhône vers le Rhône inférieur. Cette variabilité est expliquée en partie par l'influence des aménagements du Rhône pour la navigation et la production d'énergie. La lithologie du bassin peut aussi expliquer cette variabilité au travers des apports des différents affluents lors des crues ou des chasses de barrage.

Partons à la recherche du sable, dans ce fleuve réputé pour charrier surtout des graviers et transporter en suspension des fines. Pourtant, on retrouve des évocations du sable depuis le XIV^e siècle avec la présence d'orpailleurs qui cherchaient le métal précieux dans les sables du Rhône et de certains de ses affluents ([Guillemain, 1934](#)). [Guerard et Harcourt \(1885\)](#), après 10 années de suivi du delta, estiment que "d'immenses quantités de sable" se déposent à son embouchure. Les paragraphes suivants coulent d'amont en aval sur le Rhône français sans cohérence temporelle, du "Bout-du-monde" sur l'Arve jusqu'à l'exutoire du Rhône en Méditerranée.

2.2.2 Mesures sur l'Arve et le Haut-Rhône

2.2.2.1 Mesures à Genève à la station "Bout-du-Monde" (janvier 2018).

Suite à un évènement pluvieux intense sur les Alpes du Nord, associé à une fusion de la neige les 3 et 4 janvier 2018. L'Arve dépasse la crue biennale le 5 janvier 2018 avec plus de 580 m³/s. La concentration en MES est suivie par une station turbidimétrique de l'OSR en parallèle de celle de l'OFEV avec une courbe de conversion en MES construite à partir d'échantillons prélevés avec un préleveur automatique. Le 5 janvier, deux prélèvements sont effectués par deux opérateurs l'un en berge, l'autre sur le point représentatif de la moyenne de concentration dans la section à l'aide de la traile téléphérique (protocole OFEV). La concentration en fines est cohérente entre les deux échantillons mais une grande quantité de sable en suspension est présente dans l'un d'eux et complique l'interprétation des résultats. La Figure [2.14a](#) confirme bien la présence de sable en quantité ce jour là. Mais un unique échantillon ne permet pas de calculer ou de faire des hypothèses sur le flux.

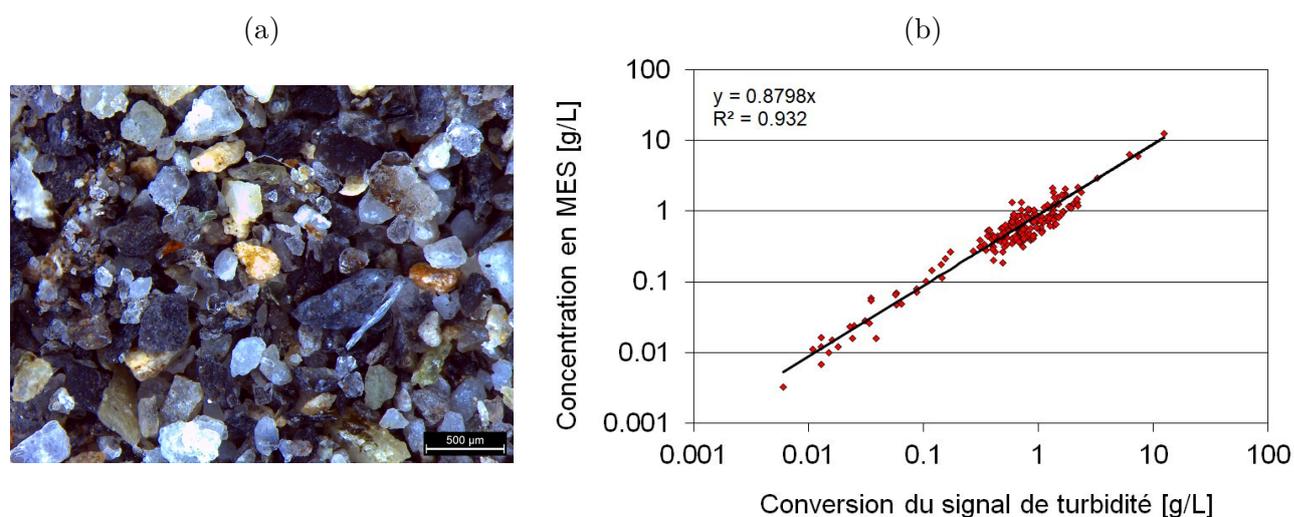


FIGURE 2.14. Photo au microscope des grains de sables prélevés en janvier 2018 dans l'échantillon du "Bout du Monde" sur l'Arve (a) et courbe de calibration du turbidimètre de l'OSR sur cette même station de l'Arve (b).

Il est intéressant d'étudier le signal de turbidité en ce mois de janvier 2018 et la loi de conversion en MES (cf. Figure 2.14b). Sur ce site, l'OFEV et l'OSR disposent chacun de leur station et de leur processus de prélèvement pour la calibration du turbidimètre : bi-hebdomadaire pour l'OFEV, avec prélèvement sur le point représentatif de la concentration moyenne dans la section et prélèvement à l'évènement pour l'OSR avec déclenchement automatique d'un préleveur. Le bilan de flux sur ce mois est de 169 000 tonnes de MES côté OSR (BDOH, 2019) pour 225 000 tonnes de MES côté OFEV (OFEV, 2019), ce qui fait 33% d'écart sur le mois de janvier. A savoir que cette crue de janvier a un poids considérable (22%) dans le volume annuel qui a transité dans la rivière (534540 tonnes). Cet exemple illustre bien la variabilité des estimations de flux de sédiments à partir d'une loi de conversion de turbidité/concentration sur un même site. De nombreuses incertitudes amènent à une telle différence de tonnage, on peut lister ici certaines des sources d'erreur. D'abord des incertitudes sur chaque échantillon individuel : Le point de prélèvement dans la section va avoir une influence sur la représentativité de la concentration prise en compte, deuxièmement la technique d'analyse de l'échantillon, comme on l'a vu précédemment, va également avoir un impact sur la concentration. Dans le cas présent, les échantillons OSR sont analysés par sous-échantillonnage par agitation-versement rapide sans séparation des sables, ce qui n'est pas idéal en présence de grosses particules. Les échantillons de l'OFEV sont filtrés en totalité sans mesure de la granulométrie, ils sont donc théoriquement plus justes en terme de concentration de la charge solide totale en suspension mais sont utilisés ensuite pour la calibration d'un signal de turbidité qui ne prend en compte que partiellement les sables. Ensuite, on a des erreurs induites par la construction de la loi de conversion turbidité/MES qui est, dans le cas de l'OSR, une régression linéaire dans l'espace logarithmique et qui va donner plus de poids aux faibles concentrations plus couramment mesurées, et induire des valeurs plus faibles. Des erreurs sur le calcul de flux vont également s'ajouter à cela : elles comprennent les incertitudes sur la mesure de débit et l'incertitude sur l'intégration du flux dans le temps.

Ces sources d'erreurs se combinent et amènent à des incertitudes importantes dont on observe les conséquences lorsqu'on étudie les bilans de volume transportés.

2.2.2.2 Mesures sur le Haut-Rhône pendant l'APAVÉR (mai 2016).

Trois exemples de campagnes de mesures sont présentés ci-après. Elles ont eu lieu lors de l'APAVÉR 2016 et son accompagnement par la gestion des ouvrages de la CNR. Trois sites de mesure ont été suivis et certaines données présentées ici ont été publiées dans un rapport de l'OSR ([Dramais et al., 2018c](#)) et en partie exploitées dans le cadre d'un master ([Henry, 2016](#)).

Analyses des sédiments

Les concentrations totales lors de ces essais ont été déterminées par la méthode de filtration sur filtres en fibre de verre ([AFNOR NF EN 872, 2005](#)). Les mesures de granulométrie des particules ont été effectuées avec un granulomètre CILAS, un sous-échantillon a été injecté dans l'instrument, les particules ont été remises en suspension par agitation mécanique et ultrasons. Dans un premier temps, ces analyses ont été réalisées classiquement en effectuant des sous-échantillonnages manuels par agitation-versement de quelques ml. La distinction sables / fines a été effectuée en isolant le pourcentage de particules supérieures à $63 \mu\text{m}$ des résultats du granulomètre laser par la méthode de démodulation. Cette distinction en deux modes a permis de déterminer une proportion de sable dans chaque échantillon. La partie restante de l'échantillon a été analysée en suivant le référentiel [ASTM D3977 \(2007\)](#). Le volume restant a donc été mesuré puis passé au tamis ($63 \mu\text{m}$), le refus a ensuite été isolé puis pesé, on a obtenu une concentration en particules de sable dans l'échantillon. On a constaté de gros écarts entre les quantités de sable estimées à partir de la démodulation des courbes de distribution granulométrique et l'analyse avec séparation des sables sur le restant de l'échantillon ([Dramais et al., 2018c](#)). Les échantillons secs ont ensuite été passés au four à moufle à 500°C pour évaluer la quantité de matière organique présente dans les sédiments. On a observé de 2 à 5 % de matière organique dans ces échantillons.

Mesures sur le Rhône frontalier à la station des Ripes

Le préleveur isocinétique de l'OFEV a été déployé depuis la traille et a permis une prise d'échantillon distribuée dans la section, point par point. Les figures [2.15](#) montrent la répartition des MES et du sable dans les échantillons récoltés lors des campagnes du 24 mai au 26 mai. On observe sur les 3 campagnes de mesures des gradients de concentration cohérents. Avec une tendance à des concentrations plus fortes en rive gauche. La répartition des fines dans la section est assez homogène avec de faibles gradients (cf. Figures [2.15](#) a, c et d) . On retrouve pour l'une des verticales de fines (cf. Figure [2.15d](#)) une suspension graduée caractéristique avec des concentrations plus fortes en profondeur mais ces gradients peuvent être aussi la preuve d'une contamination par le sable lors de l'utilisation du protocole [AFNOR NF EN 872 \(2005\)](#). A partir de ces données et de données ADCP mesurées également depuis la traille, des flux instantanés de sable et de MES ont été calculés mais sont très incertains du fait de la non séparation systématique des particules de sable. Pour la campagne du 24 mai 2016, en utilisant les données de concentration en sable obtenues après tamisage, le flux instantané est de 0,79 t/s et si l'on prend en compte la fraction sableuse séparée par la méthode de démodulation, le flux instantané est de 0,07 t/s. Ce résultat ne remet pas en cause la procédure de démodulation mais confirme une fois de plus l'importance du tamisage des échantillons avant analyse granulométrique ou de concentration.

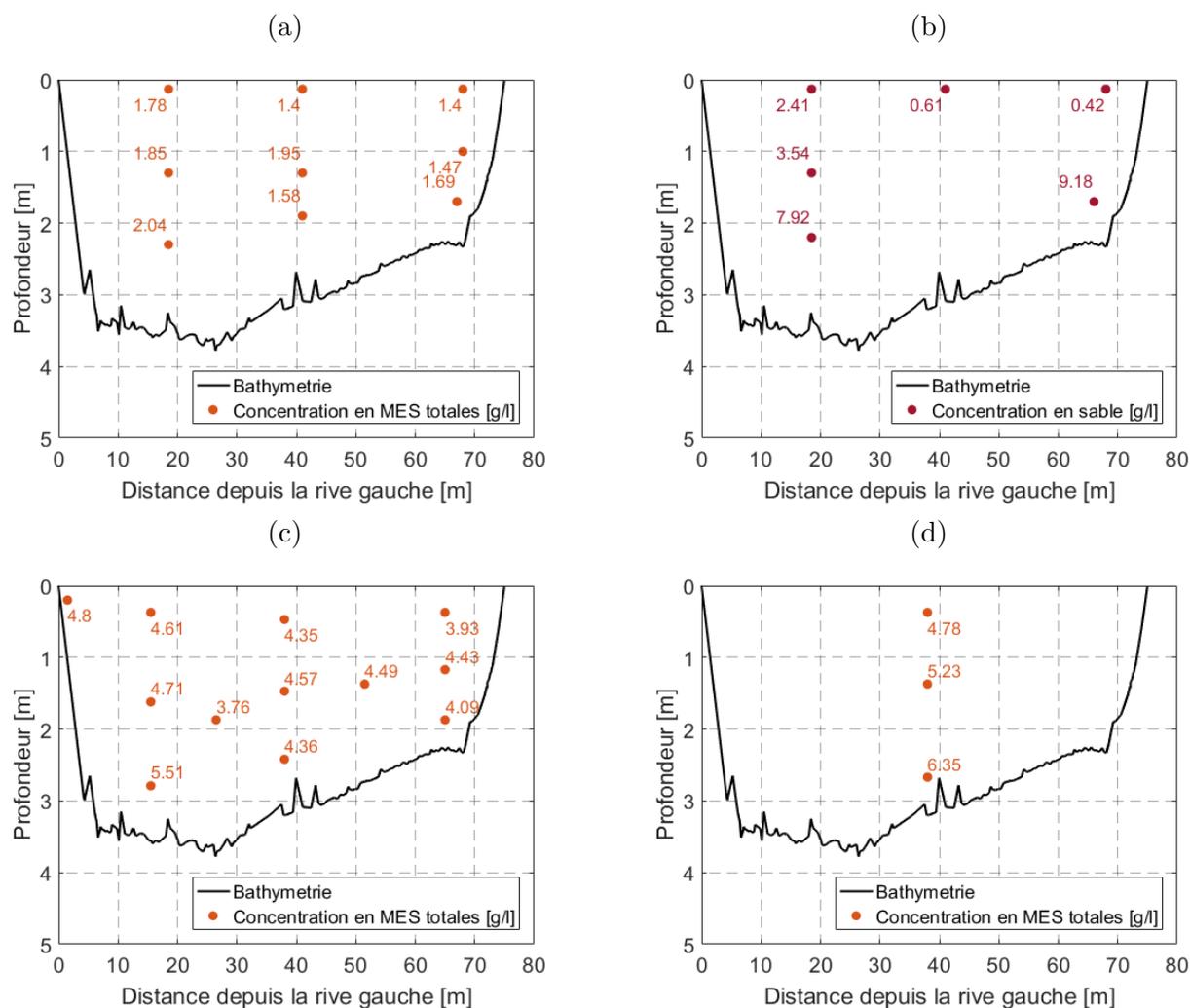


FIGURE 2.15. Le Rhône à Ripes le 24 mai 2016, concentration en MES sans séparation par tamisage (a) et en sable avec les sous-échantillons restants (b). Puis le 25 mai 2016, concentration en MES sans séparation (c) Puis le 26 mai 2016, concentration en MES sans séparation par tamisage (d).

Mesures sur le Rhône à la station de Bognes

Le préleveur P-72 (isocinétique ponctuel) a été testé sur la trille téléphérique de Bognes pour évaluer la possibilité de le déployer dans les conditions de l'APAVÉR. Ce qui a pu être réalisé en y ajoutant un poids supplémentaire pour pénétrer correctement dans l'écoulement. Les échantillons obtenus les 25, 27 et 30 mai donnent des informations qualitatives sur les sédiments transportés, en aval de Génissiat mais ne permettent pas de faire des calculs de flux. La figure 2.16 a montre la présence de sable jusqu'en surface à la station de Bognes pendant l'APAVÉR 2016. Les distributions granulométriques sont assez homogènes dans la section avec deux modes bien distincts (cf. Figure 2.16 b).

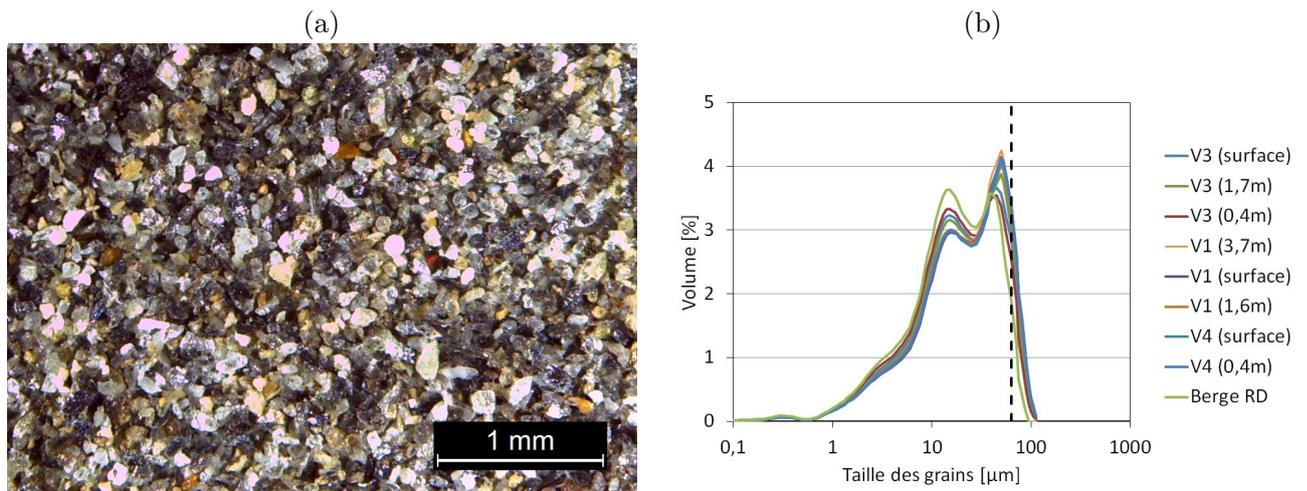


FIGURE 2.16. Photographie du sable en suspension à Bognes en surface le 27 mai (a) Distributions des tailles des sédiments dans les échantillons de Bognes le 27 mai (le trait vertical pointillé noir représente la séparation à $63 \mu\text{m}$) (b).

Mesures sur le Rhône à Champagnoux

Plusieurs jaugeages solides ont été réalisés les 23 et 25 mai, sur différents transects, depuis une embarcation, avec comme préleveur une bouteille horizontale. Là encore, le calcul de flux de sable n'est pas possible du fait du protocole d'analyse des échantillons ne prenant pas en compte le sable. On peut tout de même tirer quelques informations intéressantes de ces campagnes. La figure 2.17 a, représente les concentrations en MES totale du 25 mai dans la section, on obtient des gradients de concentration, avec une augmentation de celle-ci avec la profondeur. La figure 2.17 b montre dans la même section du PK 103,8 une exploration de la turbidité, il est intéressant d'observer que là aussi le capteur (sonde multiparamètre YSI) met en évidence des gradients, on peut supposer que ce signal traduit une stratification des sédiments fins. Au niveau de ce tronçon, les vitesses sont moins élevées que sur les sites de Ripes et Bognes. Les particules de sable en suspension sont plus fines (à ce moment-là de l'évènement), que sur les autres sites, comme le confirme la figure 2.18 a. La figure 2.18 b apporte aussi une information très intéressante sur la répartition de la distribution granulométrique sur la verticale. En effet, on observe que le mode grossier est plus présent près du fond et le mode le plus fin en surface alors qu'une distribution bimodale équilibrée est observée à mi-profondeur.

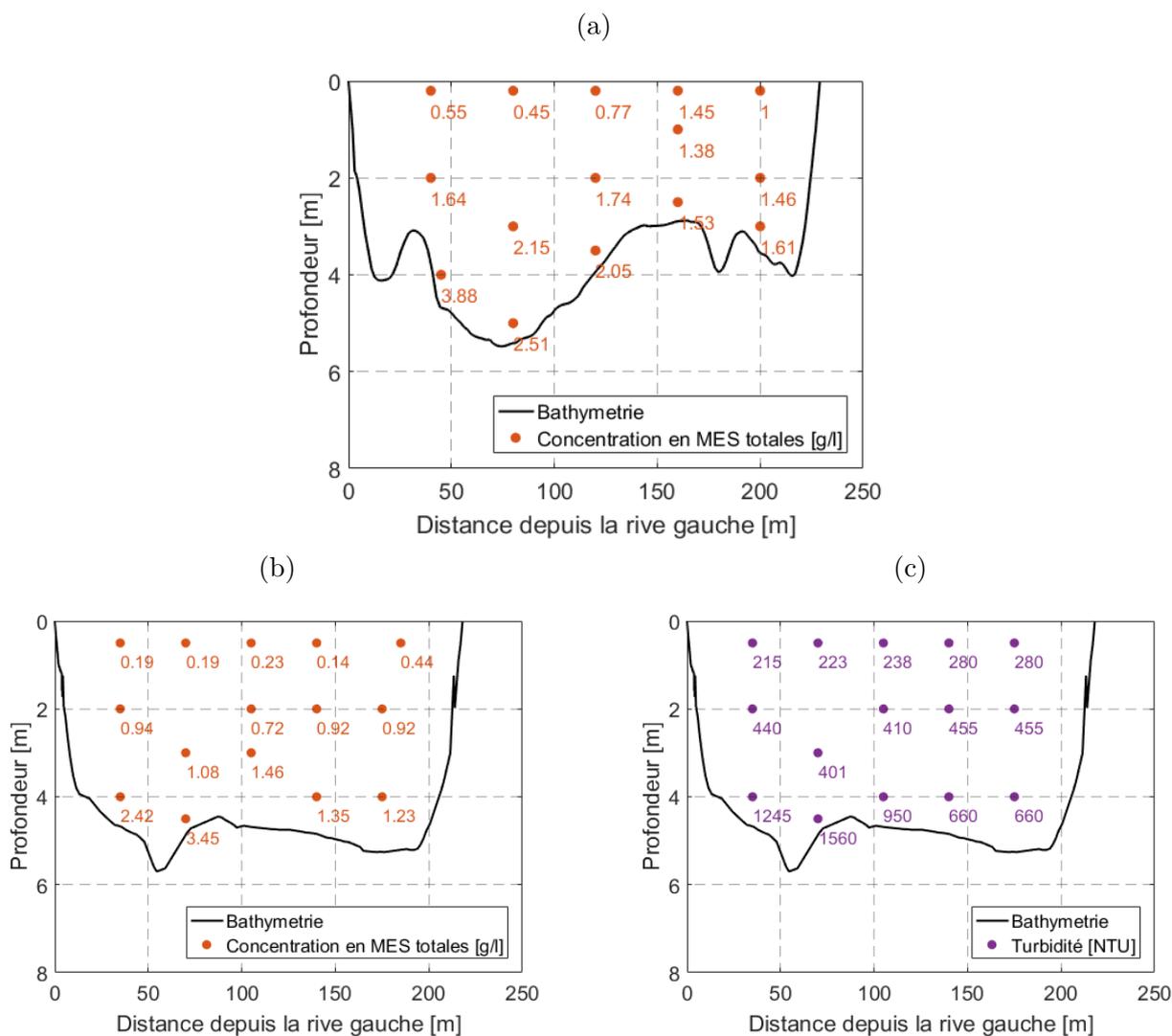


FIGURE 2.17. Le Rhône à Champagneux, concentration en MES sans séparation par tamisage au PK 107,2 le 25 mai 2016 (a). Concentration en MES sans séparation par tamisage au PK 103,8 le 25 mai 2016 (b) et turbidité mesurée dans la même section (c).

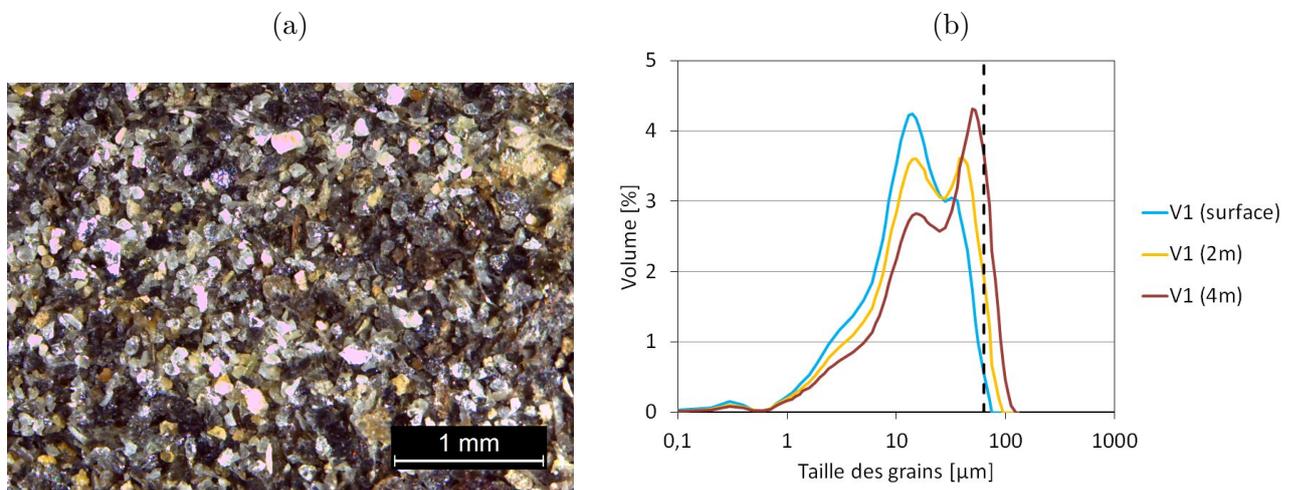


FIGURE 2.18. Le Rhône à Champagneux le 25 mai 2016 au PK 107,2 : photographie des sables en suspension présents à 4m de profondeur (a), distribution granulométrique des MES totales pour la verticale rive gauche (le trait vertical pointillé noir représente la séparation à 63 µ m) (b).

2.2.3 Mesures sur le Rhône à Lyon Perrache lors des crues de janvier 2018

2.2.3.1 Situation hydrométéorologique

Après un défilé de perturbations en décembre 2017, accompagné de neige sur le haut Rhône, puis un redoux suivi de pluies en toute fin d'année, les conditions étaient réunies pour une crue importante. Ces conditions ont maintenu des débits forts sur le haut Rhône et ses affluents. De fortes précipitations ont suivi le 3 janvier, entraînant le dépassement des seuils de veille sur plusieurs ouvrages de la CNR, puis de crue le jour suivant. L'Ain dépassant les $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ le 5 janvier. Un nouveau flux d'ouest perturbé est annoncé ensuite à la mi-janvier avec de fortes chutes de neige en montagne le 16 janvier et une réaction des affluents du haut Rhône. Ensuite va suivre dans les jours suivant un défilé de perturbations accompagné d'un redoux qui accompagne ces pluies et favorise le lessivage et la fonte du manteau neigeux. Cette conjonction d'apports associée ensuite le 22 janvier à de très forts cumuls de pluie dans le Jura et les Alpes vont entraîner des réactions hydrologiques particulièrement marquées. On notera que l'Ain atteindra son pic à $1400\text{ m}^3/\text{s}$ le 23 janvier. Les seuils de crue sont une nouvelle fois atteints le 24 janvier sur de nombreux ouvrages de la CNR. Le débit du Rhône à Perrache atteindra $2800\text{ m}^3/\text{s}$ le 24 janvier soit $200\text{ m}^3/\text{s}$ de moins que la crue décennale.

2.2.3.2 Un jeu de données rare

L'opportunité de mesurer une crue décennale sur un cours d'eau comme le Rhône à Lyon est relativement rare. Les cours d'eau plus lents permettent plus facilement d'organiser les équipes techniques pour réaliser les campagnes de mesures. Sur le Rhône à Lyon, en amont de la confluence avec la Saône, les crues sont relativement rapides : quelques heures à quelques jours.

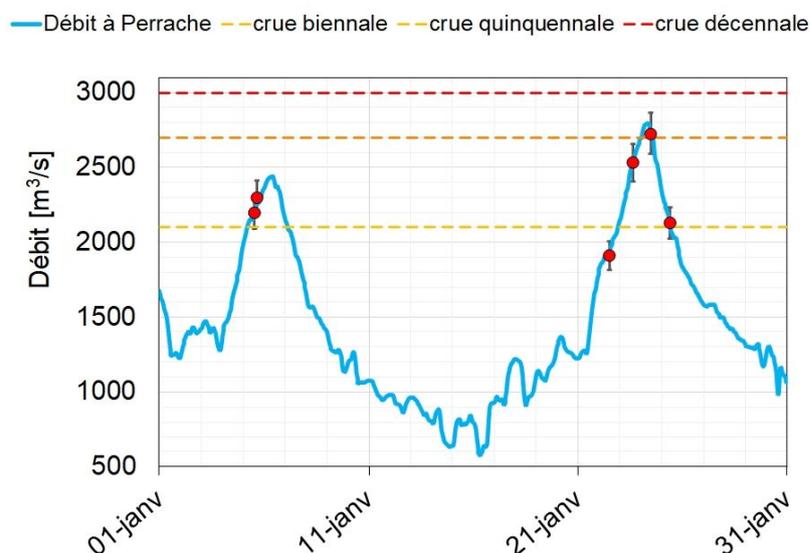


FIGURE 2.19. Hydrogramme (trait bleu) et jaugeages ADCP (points rouges avec la dispersion des données ADCP) à Perrache lors des campagnes de suivi de la crue en janvier 2018.

Il n'est donc pas courant de pouvoir observer finement un évènement exceptionnel, du fait ; premièrement, de la difficulté de le prévoir ; mais aussi du fait de la complexité d'organiser un suivi

optimal dans l'urgence en restant dans de bonnes conditions de sécurité. Cinq jaugeages solides ont pu être réalisés pendant cette période par le pôle métrologie d'INRAE et un autre en collaboration avec équipe de jaugeage du Cacoh (CNR). Les débits mesurés par ADCP pendant les jaugeages solides sont cohérents avec la courbe de tarage de la station CNR de Perrache (code station V3000015) et s'alignent bien sur l'hydrogramme (cf. Figure 2.19). Le 24 janvier, les quais piétons du Rhône ont été en partie inondés. Le débit jaugé ce jour-là est l'un des plus fort débit mesuré ces dernières années à Perrache. Les différentes phases de la crue sont échantillonnées suivant le protocole défini (Dramais, 2020a).

2.2.3.3 Concentration des sédiments transportés

Les prélèvements réalisés lors des jaugeages solides sont analysés en suivant le protocole de séparation par tamisage. Les figures qui suivent permettent d'étudier la répartition des concentrations en différenciant les sables et les fines. Lors de chaque campagne, on observe une concentration quasi-homogène des fines (cf. Figures 2.20 (a et c) à, 2.28 (a et c)) mais des gradients de sable marqués, jusqu'en surface (cf. Figures 2.20 b et d à Figure 2.28 b et d). Ces gradients sont très marqués pendant la crue. On peut supposer que certains prélèvements de fond en rive gauche ont pu être contaminés par contact du préleveur avec le fond ou par des nuages de particules de sable se déplaçant par saltation dans cette zone (cf. Figure 2.22).

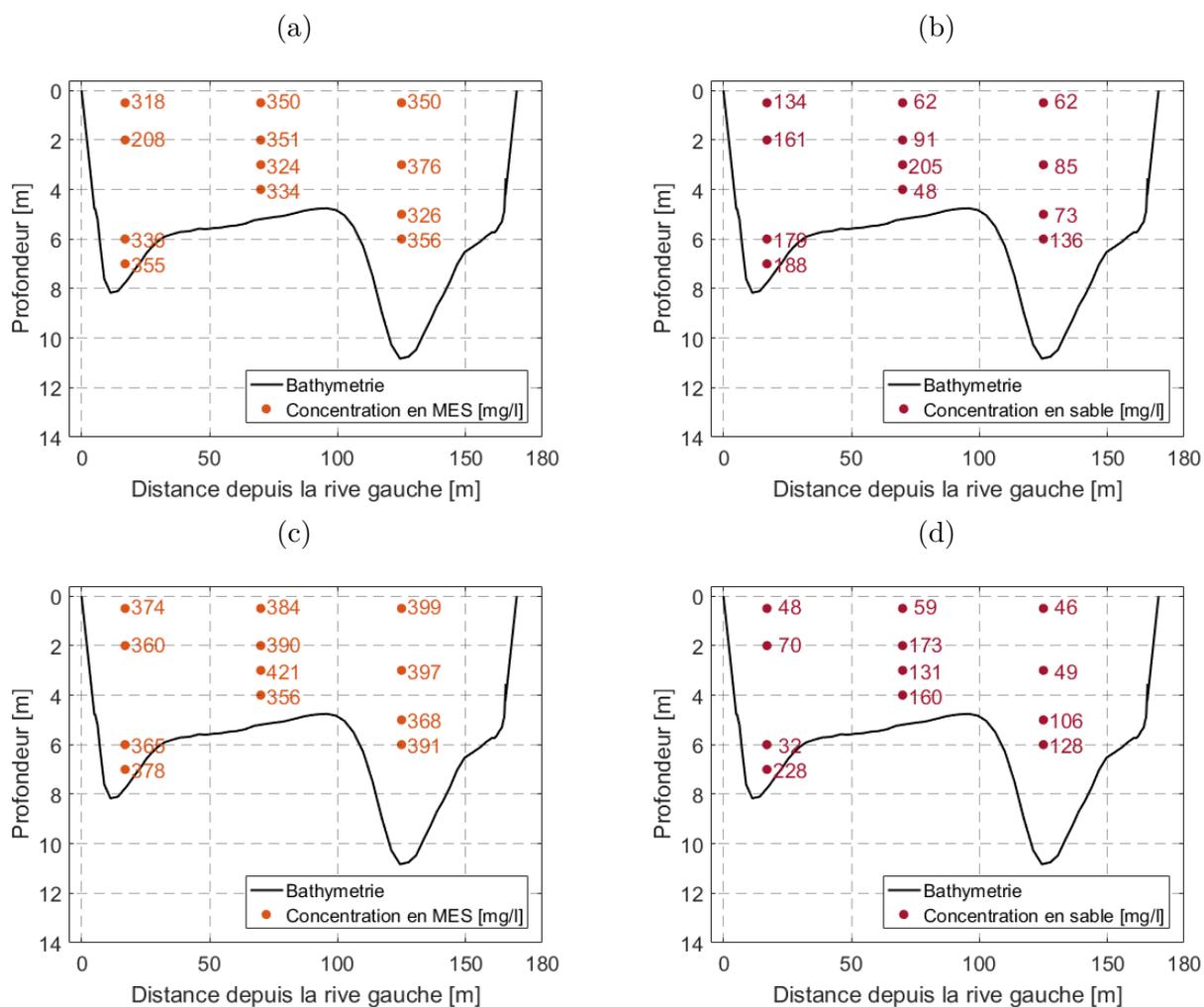


FIGURE 2.20. Répartition des concentrations dans la section sur le Rhône à Perrache le 05 janvier 2018 à 11h et 14h : concentrations en fines avec séparation par tamisage (a et c) et concentrations en sable après séparation (b et d).

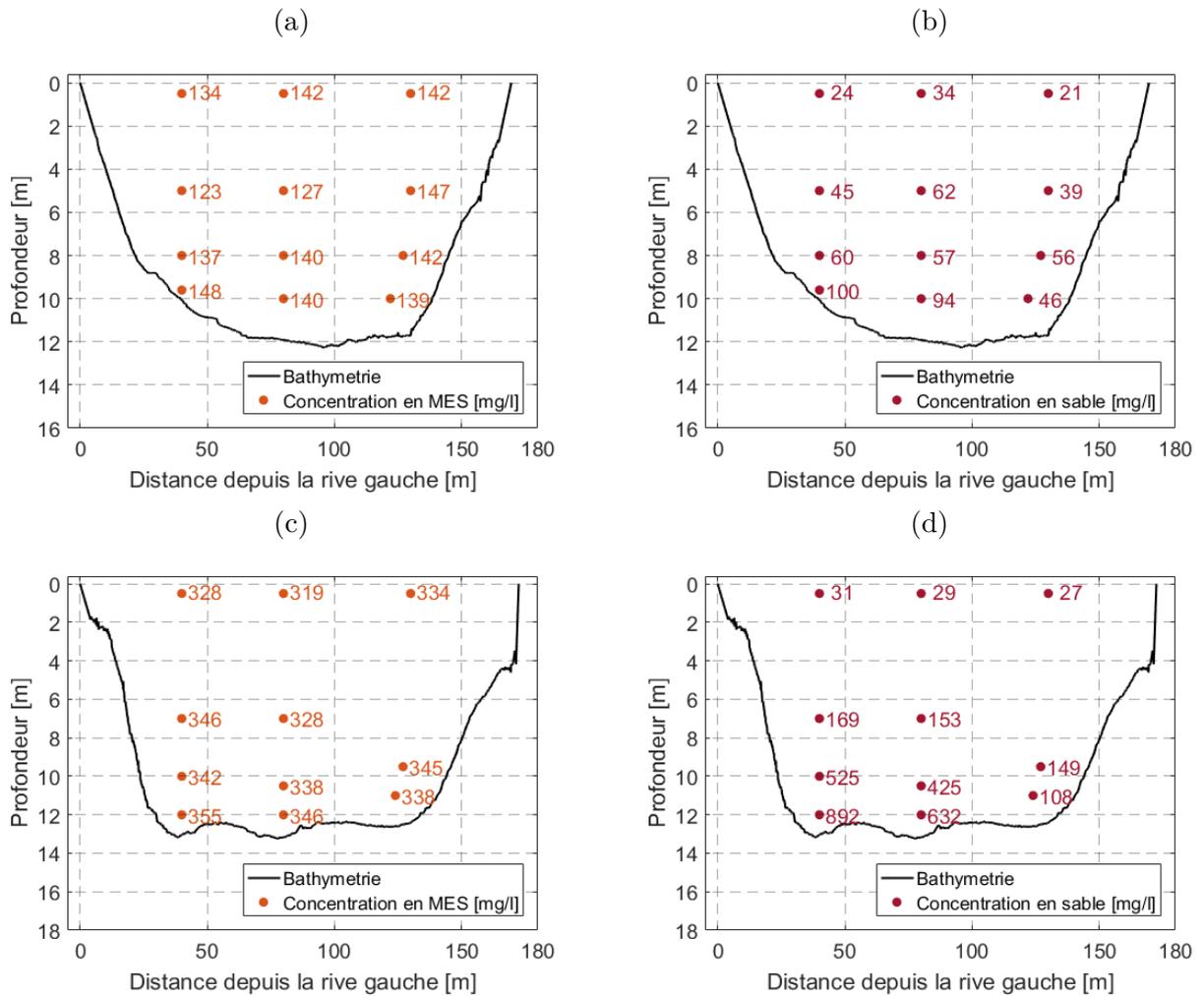


FIGURE 2.21. Répartition des concentrations dans la section sur le Rhône à Perrache les 22 et 23 janvier 2018 : concentrations en fines avec séparation des sable (a et c) et concentrations en sable après séparation (b et d).

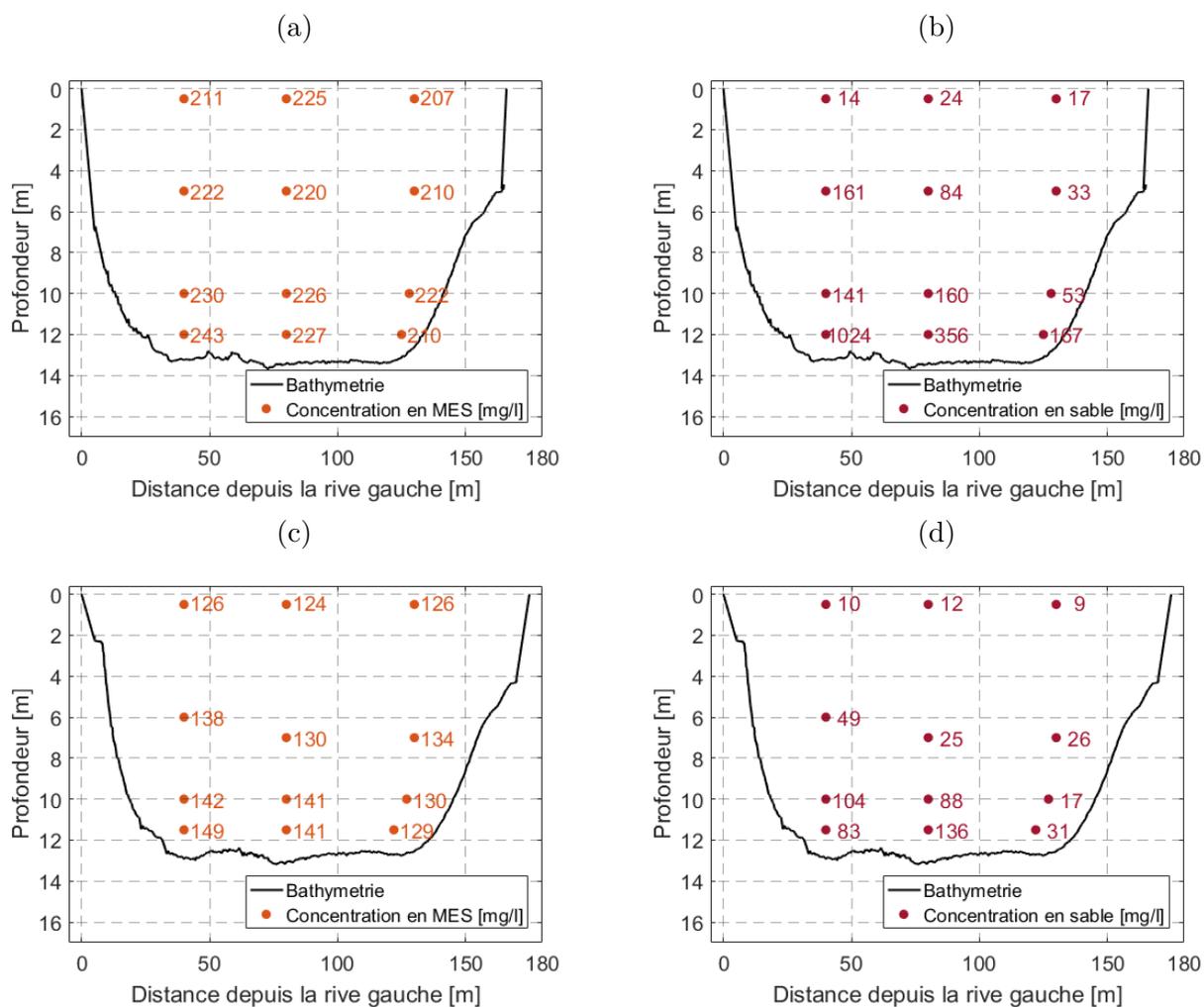


FIGURE 2.22. Répartition des concentrations dans la section sur le Rhône à Perrache, les 24 et 25 janvier 2018 : concentrations en fines avec séparation par tamisage (a et c) et concentrations en sable après séparation par tamisage (b et d).

Étudions maintenant la dynamique de l'évènement de janvier 2018 en terme de concentrations. La concentration en particules fines ($<63 \mu\text{m}$) peut être calculée grâce à la conversion de la mesure de turbidité enregistrée à la station du barrage de Jons à la diffuence du côté du canal de Jonage (cf. Figure 2.8).

A Jons si on superpose le signal de débit a celui de l'évolution de la turbidité (cf. Figure 2.23 a) on remarque que le pic de concentration arrive 5 heures avant le pic de crue pour l'évènement de début janvier et 7 heures avant pour l'évènement de fin janvier. On obtient une bonne concordance entre le signal de concentration en continu à Jons et la concentration moyenne en fines (MES avec séparation par tamisage) dans la section à Perrache (cf. Figure 2.23 b). Les concentrations mesurées à partir des échantillons du préleveur automatique à Jons sont analysés suivant le protocole de la norme (AFNOR NF EN 872, 2005) ce qui explique sans doute l'écart observé sur l'échantillon du pic (sans doute contaminé par du sable) qui présente une concentration bien supérieure à la concentration issue de la conversion de turbidité.

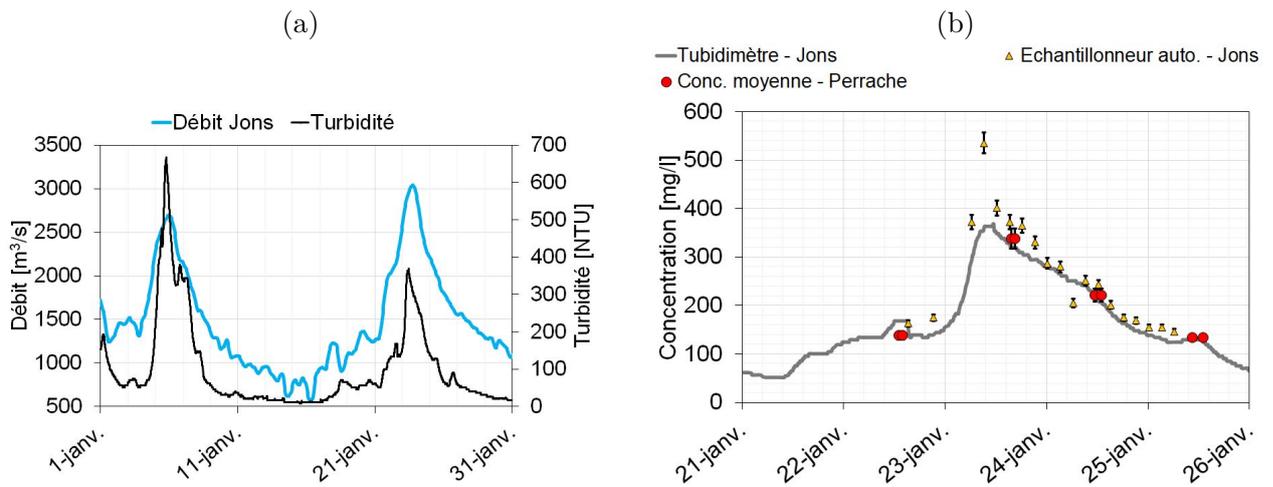


FIGURE 2.23. Crue du Rhône de janvier 2018 : Hydrogramme et signal de turbidité à Jons (a). Comparaison entre le signal du turbidimètre de Jons, les échantillons prélevés au même endroit avec un préleveur automatique (sans séparation par tamisage), (triangles jaunes) et les échantillons de fines (avec séparation par tamisage) moyennés sur la section à Perrache (points rouges) (b).

Si l'on isole la verticale centrale pour les 4 jaugeages solides de la fin janvier à Perrache, on peut présenter sous forme graphique l'évolution de la concentration en sable à différentes profondeurs durant les 4 jours de campagnes (cf. Figure 2.24). On observe une augmentation des concentrations du 22 au 23 puis une diminution durant le pic le 24 puis le 25 janvier. Le sable semble suivre la même dynamique que les particules plus fines lors de cet évènement.

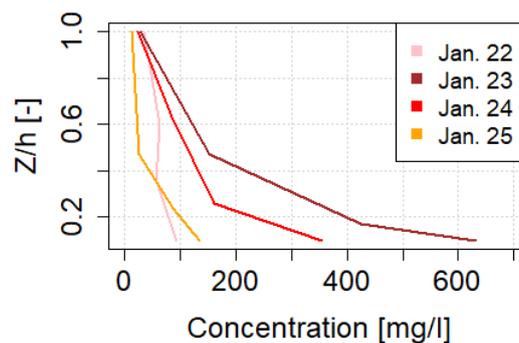


FIGURE 2.24. Évolution de la concentration en sable en fonction de la profondeur sur la verticale centrale, durant les 4 jaugeages solide de fin janvier 2018 sur le Rhône à Perrache.

2.2.3.4 Caractéristiques granulométriques des sédiments transportés

Tous les échantillons issus des jaugeages solides effectués sur le Rhône à Perrache sont analysés au granulomètre laser et pris en photo au microscope. Les échantillons ayant été tamisés à $63 \mu\text{m}$, il s'agit de faire ensuite deux analyses par échantillon et de combiner ces mesures pour obtenir la distribution granulométrique du mélange, on remarque alors la stabilité de la distribu-

métrique des fines et l'importance croissante avec la profondeur du mode sableux.

On peut également étudier l'évolution dans le temps du d_{50} aux différentes profondeurs explorées (cf. Figure 2.25) pour chacune des verticales de mesure (V1 à V3). On confirme ici l'augmentation du diamètre avec la profondeur décrit dans la littérature. Les sables transportés lors de cet événement ont un d_{50} moyen de $206 \mu\text{m}$ et de $157 \mu\text{m}$ lors des deux campagnes du 5 janvier. Le d_{50} atteint son maximum le 23 janvier puis diminue légèrement ensuite. Concentrations et distributions granulométriques en sable semblent suivre la même dynamique pendant l'évènement.

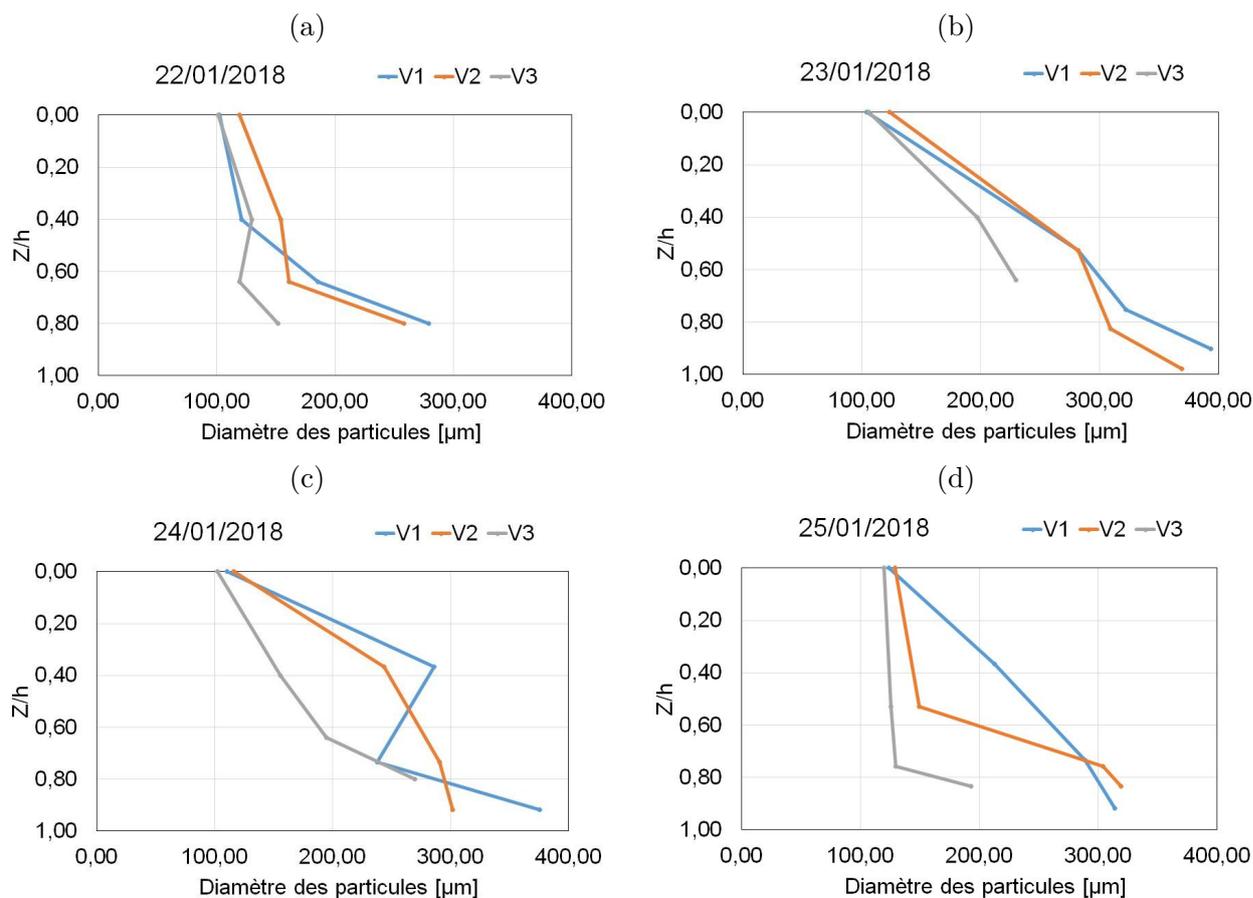


FIGURE 2.25. Evolution du diamètre médian d_{50} des sables en suspension dans le Rhône à Perrache du 22 au 25 janvier 2018.

2.2.3.5 Mobilité du fond

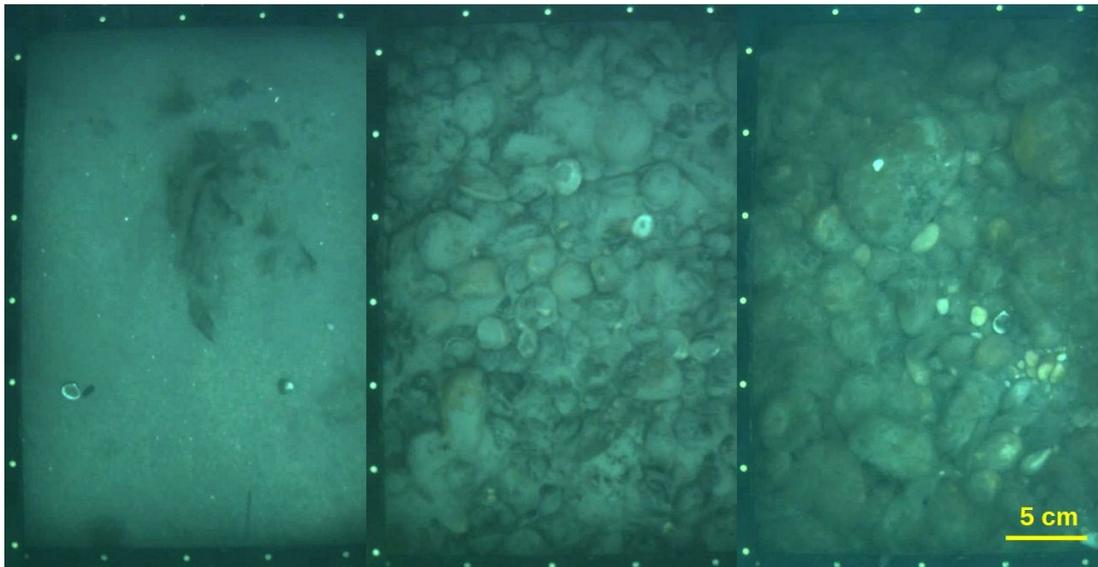


FIGURE 2.26. Montage de photos subaquatiques réalisées en février 2017 (tranchet P3 entre Perrache et la confluence, rive gauche à gauche, rive droite à droite) très proche de la zone explorée pendant les jaugages solides et correspondantes aux 3 verticales échantillonnées. Sur le même transect, une mesure à la drague de la CNR donne un d_{50} de 40 mm (photos et données du Burgeap - Grand Lyon).

Les couplages ADCP GPS peuvent permettre d'estimer une vitesse apparente du fond, et aider à estimer le charriage au fond (Rennie *et al.*, 2007). Sans aller jusque là, durant les campagnes de mesures de janvier 2018, des couplages ADCP GPS ont été effectués et ont permis de mettre en évidence la présence d'un fond mobile. Cette donnée est ici informative, en effet il est difficile d'estimer la nature, l'épaisseur ou la granulométrie de la partie mobile du fond.

L'exploitation de ces données est effectivement très délicate, en particulier en l'absence de prélèvements de la charge de fond. La vitesse apparente du fond peut être obtenue à partir de la différence entre le positionnement GPS et le positionnement de l'ADCP par rapport au fond. En effet, l'ADCP mesure son déplacement par rapport au fond, supposé fixe. En cas de mobilité du fond, la vitesse de l'ADCP va être biaisée, c'est là qu'en utilisant la vitesse de déplacement du capteur GPS (non affectée par le fond mobile) on va pouvoir estimer cette vitesse apparente du fond.

On peut voir sur la figure 2.27 a, les trajectoires ADCP (en rouge) et GPS (en bleu), on observe une divergence au centre de la section. La figure 2.27 b représente la vitesse apparente du fond calculée à partir des données du couplage. Ce cas du 23 janvier est très intéressant car la mobilité maximale du fond est observée dans la partie gauche de l'écoulement, c'est également dans cette partie que l'on observe les concentrations les plus fortes (cf. Figure 2.21 d) et les d_{50} les plus élevés (cf. Figure 2.25 d - verticale V1). L'intégration de cette indication de mobilité du fond pourrait à terme rentrer dans le calcul de flux moyennant des mesures complémentaires dans cette zone pour mieux comprendre cette couche mobile.

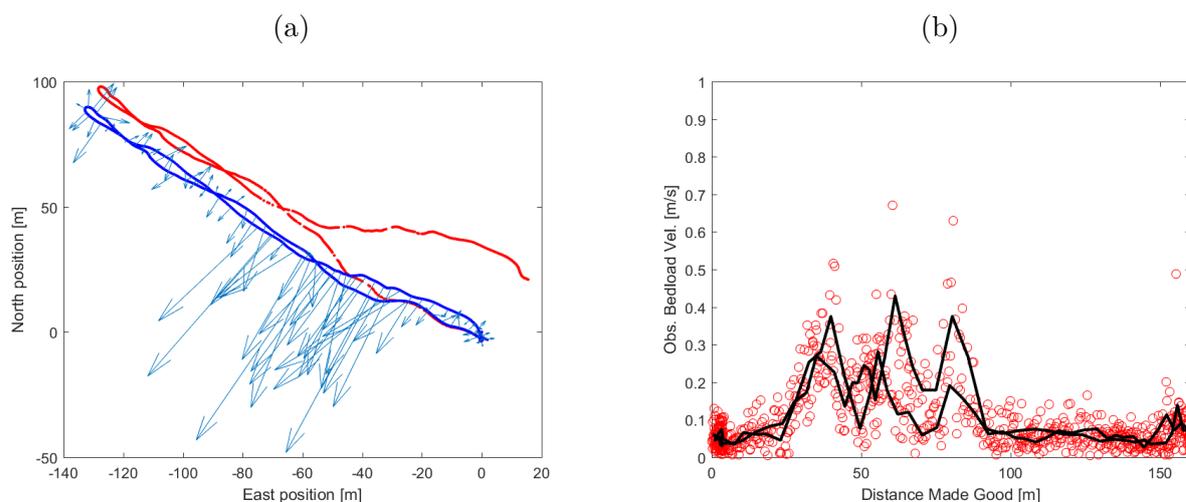


FIGURE 2.27. Étude du fond mobile à Perrache sur le Rhône le 23 janvier à partir de mesures ADCP aller-retour : trajectoires ADCP (en rouge) et GPS (en bleu), la taille des vecteurs vitesse est proportionnelle à l'intensité de celle-ci (a) ; Vitesse apparente du fond, points de mesure individuels (rouge) et moyennes (noir) lors des deux passages (b).

2.2.3.6 Données complémentaires

En plus des jaugeages solides effectués pendant la crue de janvier 2018, trois autres jaugeages solides ont été réalisés : le 13 décembre 2017 sur la section amont du tronçon durant une phase d'oscillations de décrue ; le 12 juin 2018 sur la section aval pendant une période de montée lente (cf. Figure 3.5) ; et enfin le 06 mars 2020 en montée de crue (proche du pic). Les débits pendant ces trois jaugeages solides étaient plus modestes que pendant la crue de janvier 2018. Lors des deux événements de décembre et juin 2018, les concentrations en sable étaient beaucoup moins marquées qu'en janvier. Le jaugeage solide de juin 2018 présente des concentrations en sable extrêmement faibles, ceci met en défaut l'approche de calage du profil exponentiel, comme on le verra dans les chapitres suivants. L'adaptation de la méthode de calcul des flux normalisée est probablement mieux adaptée dans ce cas là, pour déterminer le flux. Le jaugeage de mars 2020, quant à lui est aussi très intéressant car l'évènement fait suite à une crue de l'Ain et une quantité de sable non négligeable est transportée (cf. Tableau 3.1).

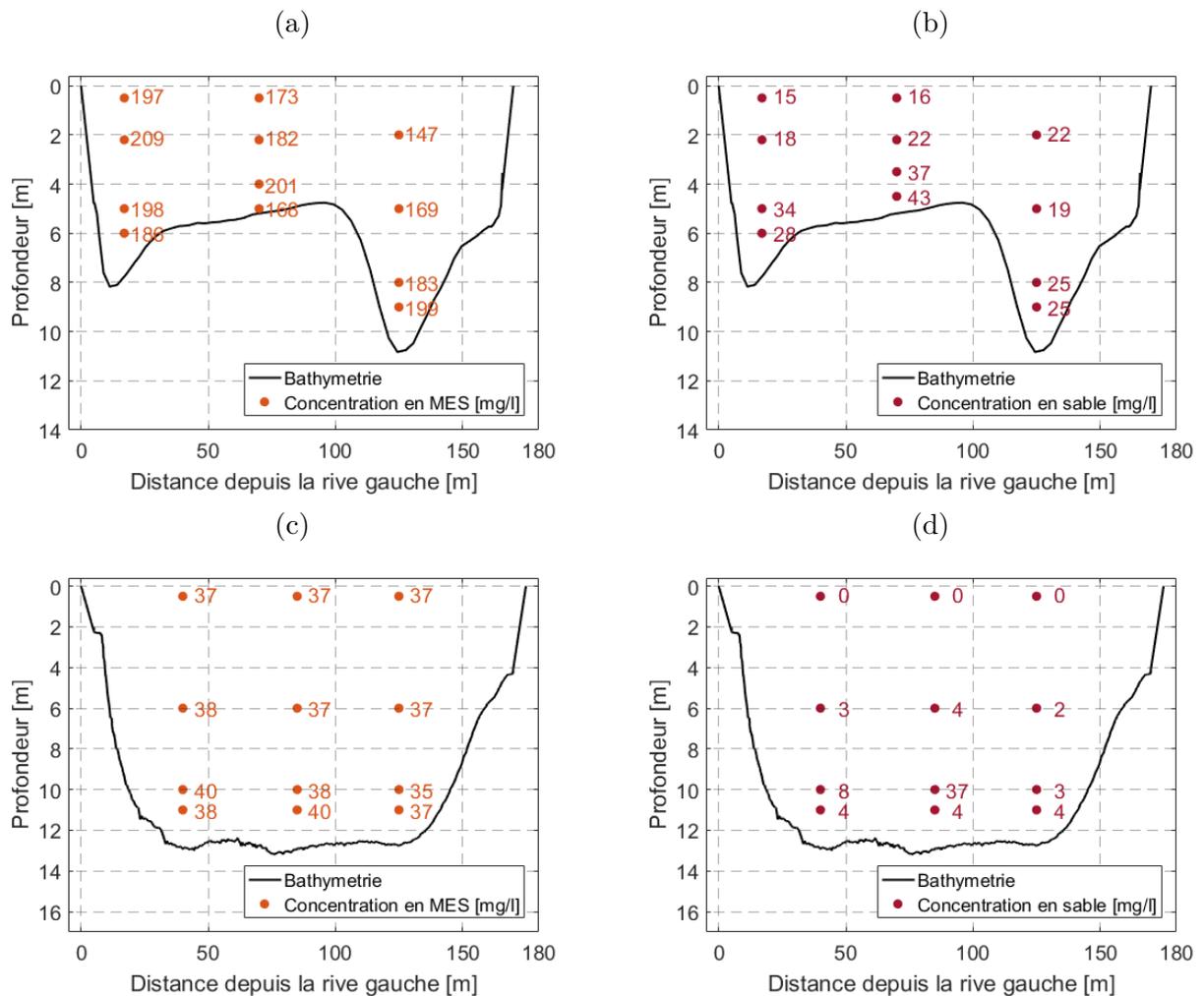


FIGURE 2.28. Répartition des concentrations dans la section sur le Rhône à Perrache le 13 décembre 2017 et le 12 juin 2018 : concentrations en fines avec séparation par tamisage (a et c) et concentrations en sable après séparation par tamisage (b et d).

2.2.3.7 Calcul des flux sur le Rhône

Le débit liquide à Jons est modélisé avec le modèle MAGE (Dugué *et al.*, 2015). La combinaison du débit modélisé et de la chronique de concentration permet de modéliser le volume d'eau et les flux de particules. Les flux et volumes sont calculés par les outils de calcul de la base de donnée de l'OSR sur BDOH (Thollet *et al.*, 2018). Si on considère le volume annuel d'eau passé par Jons en 2018, 1/5 de ce volume est passé en janvier (seulement 6 jours en-dessous de $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ au mois de janvier, ce qui est remarquable). On contraint la durée des deux crues à 5 jours autour du pic pour pouvoir les comparer. En terme de volume d'eau, les deux crues contribuent à plus de la moitié du volume passé en janvier (cf. tableau 2.2). Le flux de particules (MES sans séparation par tamisage) qui a transité pendant les deux évènements est plus important pour la première crue que pour la seconde. Le second évènement atteint un débit plus fort mais la concentration en MES (sans séparation du sable) est plus forte sur le premier évènement, ce qui explique les écarts. Fin janvier à Jons, près de 60% du volume annuel de MES (sans séparation par tamisage) est passé.

Durée	Volume d'eau [Mm^3]	Flux cumulé MES [Mt]	Débit de pointe [m^3/s]	Concentration de pointe (MES) [g/l]
04 au 09 janvier 2018	880	0,28	2700	0,72
21 au 26 janvier 2018	990	0,19	3050	0,40
Janvier 2018	3900	0,57	3050	0,72
Année 2018 (hydrologique)	20100	0,98	3050	0,72

TABLE 2.2. Données de 2018 à Jons sur le Rhône (issues de la base de données BDOH).

2.2.3.8 Conséquences des évènements de janvier 2018

Des quantités de sable importantes ont donc transité dans le Rhône pendant les crues de janvier 2018. Une partie de ce sable s'est déposée dans la traversée de Lyon comme constaté par les équipes de la Métropole en charge de l'entretien de ce tronçon du Rhône. 6 000 m^3 de sable avaient été dragués en 2017 sur le secteur du mouillage des péniches en rive gauche du Rhône, un suivi bathymétrique partiel après les crues de janvier a permis d'estimer qu'une quantité équivalente avait été déposée pendant l'évènement (André, 2018).

24 péniches sont à quai dans ce secteur et la Métropole entretient les mouillages régulièrement par des dragages. Ce phénomène est loin d'être nouveau, deux études de la CNR en 1989 et 1991 (CNR, 1989, 1991), proposaient alors plusieurs solutions techniques d'aménagement local pour pallier l'ensablement de ce secteur. 38450 m^3 ont été déplacés entre 1989 et 2017 sur ce secteur des mouillages entre le Pont de Lattre de Tassigny et le Pont Lafayette.

En janvier 2018, de grandes quantités de dépôts de sable ont aussi été observées sur les berges du vieux Rhône à l'aval du barrage de Pierre-Bénite (cf. Figure 2.29). Des dépôts de sable ont été également observés dans le delta de l'Ain après l'évènement, par contre peu de dépôts ont été observés entre les canaux de Miribel et Jonage. Peut-être que ce secteur est trop dynamique en crue pour permettre les dépôts et une partie de la zone n'a pas pu être observée du fait de son étendue et des zones réglementées (champs captant). On retrouve une partie du sable à l'arrivée dans Lyon en rive gauche puis dans le vieux Rhône à l'aval du barrage de Pierre-Bénite lorsque le Rhône peut déborder dans son lit majeur et sans doute plus bas.



FIGURE 2.29. Photos de dépôts de sable relevés en rive droite sur le Rhône court circuité de Pierre-Bénite entre Vernaison et Givors (PK 11 à 16) après la crue de janvier 2018. Photos du 26 février 2018.

2.2.3.9 Origine des sables déplacés par les évènements de janvier 2018

Afin de déterminer l'origine des sables en suspension, plusieurs stratégies sont possibles :

- Une approche en termes de flux liquides couplée à des observations de flux et avec l'aide d'une modélisation hydraulique, peut permettre d'effectuer des hypothèses sur la provenance des sédiments et leur répartition dans le bassin versant (Launay *et al.*, 2019a). Dans le cas de la crue de janvier, une telle étude n'a pas été réalisée mais serait très intéressante, cependant il faudrait un modèle qui permette de représenter le transport du sable. Si l'on observe la dynamique hydrologique des évènements de janvier, on peut supposer que la proportion de débit liquide dans la crue à Perrache est majoritairement de l'eau de l'Ain, probablement accompagnée de grosses quantités de sable.
- Une approche géologique par la pétrologie et la géochimie. En analysant la composition des échantillons, il faudrait trouver des éléments discriminants qui permettent de retrouver des indices sur la provenance des sables du Rhône. Des études de ce type sont menées sur de grands bassins versants du monde par l'Université de Milan (Garzanti *et al.*, 2006, 2007, 2016). Pour effectuer le tri complet d'un échantillon de sable, il faut plusieurs centaines de grammes, plus encore si l'on veut effectuer une datation. Les quantités prélevées en suspension sont trop faibles dans notre cas pour que la minéralogie soit analysée, elle peut cependant être effectuée sur des dépôts. Une autre difficulté est que la diversité géologique des bassins

versants des différents affluents du Rhône ne permettrait pas de déterminer précisément l'origine des sables déplacés ou déposés dans le Rhône. Enfin, il faudrait savoir déterminer la part de sédiment mobilisée directement par l'érosion des versants de celle qui provient de reprises de dépôts anciens au cours de l'évènement.

2.2.4 Mesures sur le Bas-Rhône

2.2.4.1 Mesures à Bourg-les-Valences à la confluence de l'Isère et du Rhône (Mai 2015).

Le suivi des apports sédimentaires de la Basse-Isère au Rhône est assez complexe. La confluence avec le Rhône est également un aménagement hors du commun avec le barrage Isère qui permet de dévier les débits les plus forts vers l'ancien bras naturel du Rhône, en protégeant le barrage usine de Bourg-les-Valences utilisé pour la production d'électricité et la navigation. En mai 2015, une crue quasi-décennale affecte la Basse-Isère, plus de 1500 m³/s sont mesurés à la station de Beaumont-Montoux, elle est accompagnée d'une chasse des différents ouvrages de la chaîne de production de la Basse-Isère. Une campagne de mesures les 4 et 5 mai 2015 a été effectuée, elle comportait des mesures ADCP, des prélèvements dans le canal d'amenée et sur l'Isère juste en amont de la confluence. Pour des raisons de sécurité et d'accès, aucune mesure n'a pu être réalisée plus en amont sur l'Isère, des campagnes de mesures du transport solide par charriage ont également été effectuées depuis la traille téléphérique de Beaumont-Montoux pendant et après l'évènement (Naudet *et al.*, 2016).

Les données ADCP de cette campagne ne sont pour la plupart pas exploitables, les concentrations extrêmes atténuent fortement les signaux acoustiques et la détection du fond notamment. Des mesures de température ont été effectuées, celle de l'Isère en surface est comprise entre 11 et 12 °C pendant ces deux jours tandis que celle du Rhône est comprise entre 14 °C et 15 °C. Nous n'avons pas observé d'évolution longitudinale de la température de surface du Rhône. La figure 2.30 illustre l'influence combinée de la température, de la concentration et du mélange sur le champ de vitesse. Il s'agit d'un champ de vitesse mesuré à l'ADCP sur le Rhône dans une section transversale en aval de la confluence du Rhône et de l'Isère. On remarque un courant fort de plus de 2 m/s dans la partie basse de la section. Il s'agit de l'eau de l'Isère plus fraîche et plus concentrée en sédiments (au fond 20 g/l contre 0,3 g/l pour le Rhône). La vitesse et la viscosité de l'eau de l'Isère étaient plus importantes que celle de l'eau du Rhône, sa densité était également légèrement supérieure ce qui explique que l'eau de l'Isère "plonge" au fond du canal usinier du Rhône.

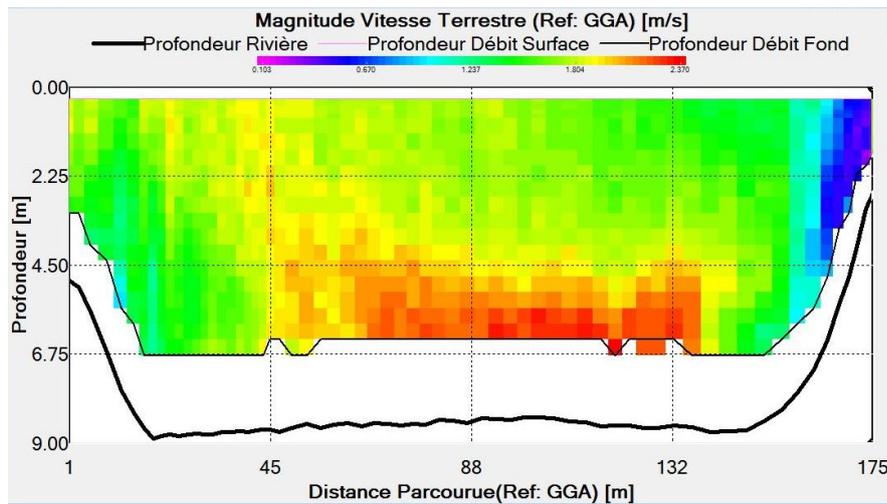


FIGURE 2.30. Champ de vitesse mesuré (ADCP RG 600 kHz) sur le Rhône en mai 2015 en aval de la confluence avec l'Isère illustrant le mélange d'eaux aux densités différentes.

Les prélèvements pour la mesure de concentration montrent sur l'Isère une concentration de surface de 5 g/l qui augmente graduellement jusqu'à près de 20 g/L près du fond (cf. Figure 2.31 b). Il s'agit de mesures de la MES totales, incluant donc les sables. Les dépôts analysés par la CNR autour des ouvrages de Bourg-les-Valences montrent la présence de grandes quantités de limons grossiers et sables fins (50 à 200 μm). Les données de cet évènement ont été exploitées (Camenen *et al.*, 2019b) pour évaluer la dynamique du sable dans ce système complexe par une approche multi-technique (mesures acoustiques, turbidité, prélèvement de la suspension et du charriage, étude de la bathymétrie, granulométrie) qui permet d'affiner au mieux l'évaluation et la dynamique des flux de sable, notamment à l'aide d'une approche par courbe de tarage sédimentaire que nous détaillerons par la suite.

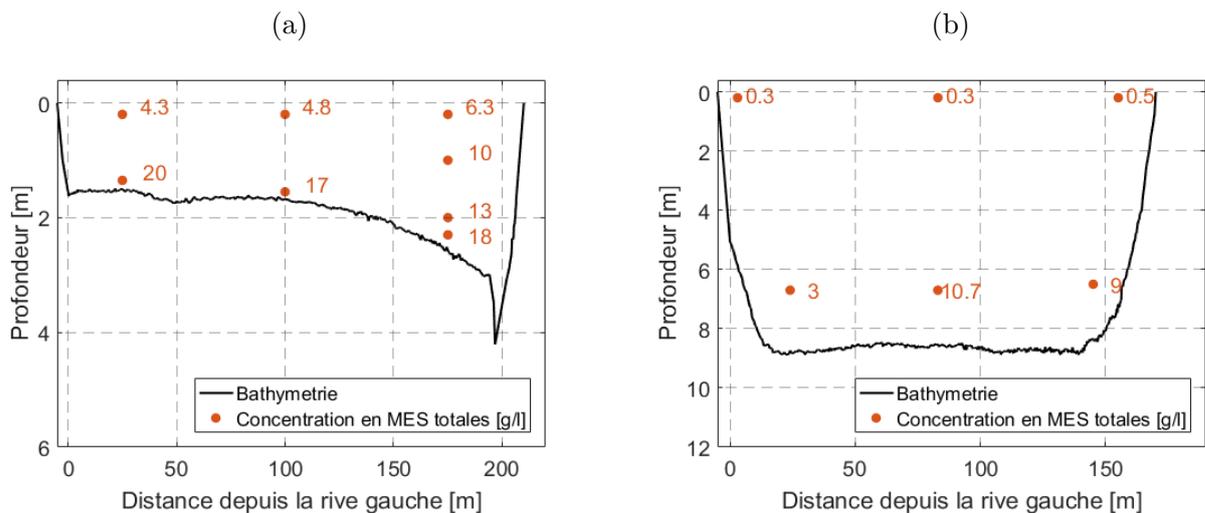


FIGURE 2.31. Répartition dans la section des concentrations en MES sans séparation par tamisage sur : L'Isère à la confluence avec le Rhône le 4 mai 2015 (a) Le Rhône au PK 101,7 le 4 mai 2015 (b).

2.2.4.2 Mesures à Bourg-lès-Valences à la confluence de l'Isère et du Rhône (Janvier 2018).

Une campagne de mesures a eu lieu les 6 et 7 janvier 2018 à la confluence de l'Isère et du Rhône. Un suivi avec prélèvements a été réalisé depuis le pont "véloroute" par les équipes d'Irstea de la CNR et d'EDF. Plusieurs préleveurs ont été déployés, une bouteille de Delft et un préleveur type bouteille horizontale. Une campagne de mesures avec mesures ADCP et Aquascat ainsi que des échantillons par bouteille horizontale ont également été réalisés. Les échantillons ont été analysés avec séparation des sables par tamisage. Des mesures de température ont été effectuées, celle de l'Isère en surface était autour de $7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant ces deux jours tandis que celle du Rhône était autour de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. On a donc encore une fois un mélange rendu plus long par la différence de densité des eaux. On déduit bien le mauvais mélange sur les figures 2.32 a et b, autant pour les particules fines que pour le sable.

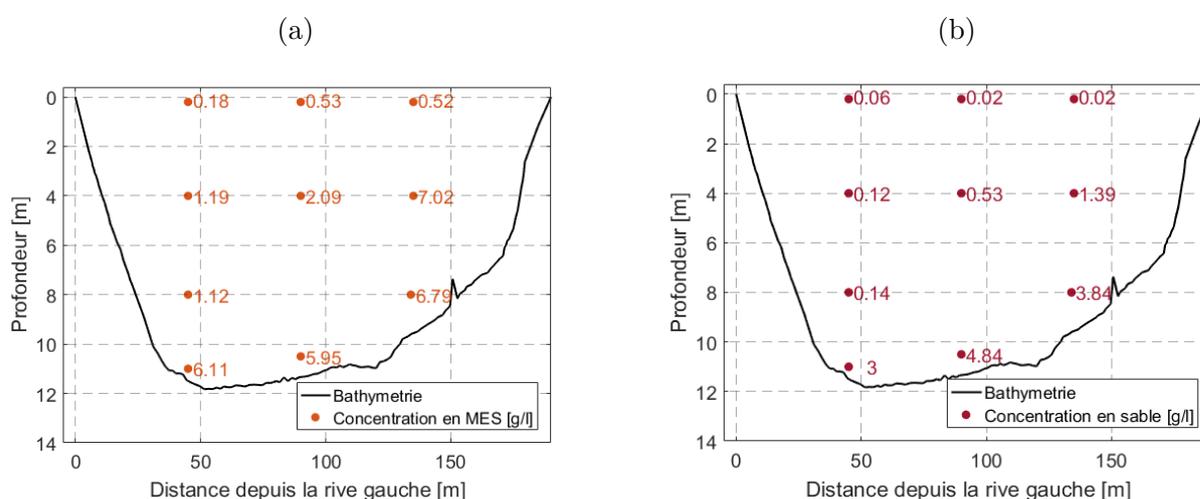


FIGURE 2.32. Répartition dans la section des concentrations sur le Rhône le 6 janvier 2018 au PK 102,7 en aval de la confluence avec l'Isère : concentrations en fines avec séparation par tamisage (a) et en sable avec séparation par tamisage (b).

2.2.4.3 Mesures à Port-Saint-Louis-du-Rhône lors d'une crue (Novembre 2016).

On trouve des fonds sableux dans les deux bras du delta du Rhône. [Arnaud-Fassetta et al. \(2003\)](#) établissent que la granularité des sédiments du fond diffère dans les deux bras du delta. Ce sont les galets et les sables grossiers à moyens qui caractérisent les fonds du Grand Rhône, alors que le Petit Rhône ne reçoit que des sables moyens à fins. Une transition brutale entre les galets et les sables est mise en évidence 25 km en amont de l'embouchure du Grand Rhône. [Arnaud-Fassetta et al. \(2003\)](#) expliquent cette transition par la conjonction de trois facteurs : structural (affleurement du cailloutis durancien pléistocène ou des cordons littoraux à galets holocènes), géomorphologique (réduction locale de la pente du lit, effet de seuil) et hydraulique (réduction des puissances spécifiques).

Dans l'étude [Sogreah \(2000a\)](#), les auteurs analysent les données de MES entre Beaucaire et Arles et proposent des lois d'ajustement de la concentration en MES en fonction du débit, en dissociant les hautes eaux ordinaires (au-dessous de $3\ 000/4\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$) et les crues. L'exploitation de mesures

faites par Sogreah en 1956 sur toute la verticale a permis de mettre en évidence le biais introduit par les mesures de surface uniques réalisées en général. En effet, ils ont observé qu'en régime moyen, la concentration en suspension est relativement homogène sur toute la hauteur. Cependant, une hétérogénéité apparaît lors des plus forts débits, avec des concentrations nettement plus fortes à proximité du fond. Les auteurs annoncent que la non prise en compte de ce phénomène conduit à sous-estimer les volumes solides transités lors des fortes crues. Malheureusement, les données de 1956 n'ont pas été retrouvées, il s'agit des données rassemblées par Lorgeré (1957, 1959). L'étude de Sogreah (2000b) qui reprend ces résultats indique la présence d'une suspension graduée de sable pendant les crues. Les mesures réalisées en novembre 2016 nous apportent une autre preuve d'une suspension de sable lors de cet évènement plus récent, jusqu'en surface.

En novembre 2016, des pluies intenses liées à des flux de sud ont provoqué des orages importants sur le sud-est de la France, entraînant des crues de tous les affluents rive droite du Rhône (Gardons, Cèze, Ardèche, Gier, Eyrieux) ainsi que la Durance en rive gauche. Ces montées soudaines des eaux ont à leur tour provoqué une crue du Rhône dans sa partie aval entre le 22 et le 26 novembre 2016 avec un pic de crue le 23 novembre à plus de 6 000 m³/s.

Les conditions très difficiles de navigation, associées à des problèmes techniques ont rendu très compliquée la réalisation des mesures prévues. Deux points de surface et une verticale de mesure complète ont été effectués par échantillonnage à la bouteille horizontale le 23 novembre à Port-Saint-Louis-du-Rhône au PK 322 et le lendemain, un jaugeage solide a été en partie réalisé à proximité de la section du bac de Barcarin plus en amont. Les deux campagnes de mesures ont eu lieu pendant la phase de décrue de l'évènement à 5 000 puis 2 500 m³/s.

Rivière	Date et heure	Précision lieu de prélèvement	Concentration [g/l]
Rhône	22 novembre 2016-17h20	Restitution usine CNR de Baucaire, surface au centre de l'écoulement, (Cacoh)	3,46
Rhône	23 novembre 2016-8h10	PK 322 en surface à 130m de RD (INRAE)	4,95
Rhône	23 novembre 2016-8h10	PK 322 en surface à 130m de RG (INRAE)	5,04
Durance	24 novembre 2016-16h	1 km en amont de la confluence avec le Rhône, surface au centre de l'écoulement, (Cacoh)	4,75

TABLE 2.3. Prélèvements manuels effectués lors de la crue de novembre 2016

Les deux échantillons de surface au PK 322 ont été prélevés lors d'une première traversée à 8h10 le 23 novembre. La concentration en MES totale est exceptionnelle pour le Rhône : 5,04 g/l à 130 m de la rive droite et 4,95 g/l à 130 m de la rive gauche, ce qui est cohérent avec les concentrations mesurées à Arles par la station de l'OSR. Cette concentration est la plus forte concentration mesurée sur le Rhône dans ce secteur depuis la crue de juin 2008. Comme indiqué dans le tableau 2.3, de fortes concentrations sont mesurées dans le secteur pendant cette période. La verticale de mesure de Port-Saint-Louis-du-Rhône a été réalisée à proximité de la rive gauche (35m) dans une zone peu turbulente. En effet, les conditions de navigation étaient très difficiles ce jour là avec une forte houle et de grandes difficultés à stabiliser le bateau. Malgré ces conditions, les échantillons obtenus sont très intéressants et permettent de mettre en évidence un gradient de concentration en MES totale importante (cf. Figure 2.33 a), ainsi qu'un gradient de sable en suspension (cf. Figure 2.33 b).

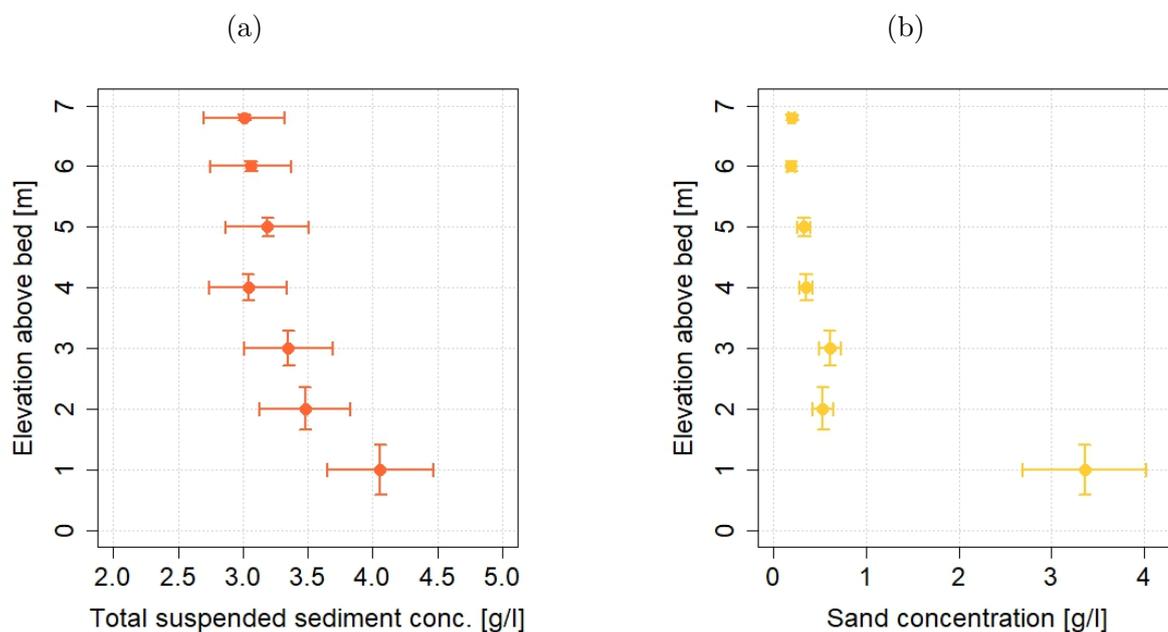


FIGURE 2.33. Verticale de concentration mesurée à Port-Saint-Louis-du-Rhône le 23 novembre 2016 entre 15h et 16h : Profil de concentration en MES totales (a), profil de concentration en sable (b).

Le lendemain (24 novembre) une campagne de mesures a été réalisée au niveau du bac de Barcarin en amont de Port-Saint-Louis-du-Rhône. Un fond mobile a été détecté par l'ADCP, sa vitesse apparente est de 0,53 m/s. Malheureusement, les mesures ADCP ne sont pas exploitables pour le calcul du flux de sable car la synchronisation avec un GPS n'a pas été possible ce jour-là. La distribution des concentrations est explorée avec une bouteille horizontale sur toute la profondeur. Les figures 2.34 a et b montrent la répartition des concentrations dans la section, on observe bien des gradients de MES totales et sables, l'un des échantillons de fond a été probablement contaminé par contact avec le fond. Les échantillons secs sont passés au four à moufle de laboratoire qui permet d'évaluer une quantité de 2 à 9% de matière organique dans la matière sèche récupérée.

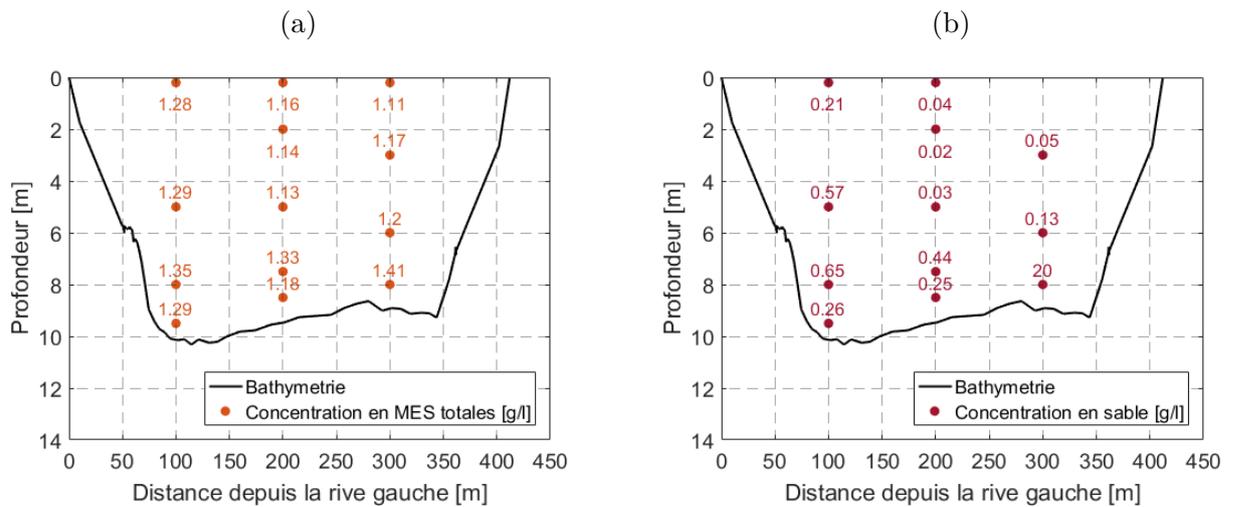


FIGURE 2.34. Distribution des concentrations dans la section de Barcarin le 24 novembre 2016 entre 11h et 12h : Distribution des concentrations en MES totales (a), Distribution des concentrations en sable (b).

La distribution granulométrique des MES totales est assez homogène sur toute la série d'échantillons du Rhône à Port-Saint-Louis-du-Rhône et Barcarin. Cette granulométrie est multimodale. On observe sur la série d'analyses de Port-Saint-Louis-du-Rhône une légère augmentation de la taille maximale des particules lorsqu'on se rapproche du fond (cf. Figure 2.35 b). On observe du sable en suspension surtout à proximité du fond mais aussi en surface comme le montre les concentrations en sable présentées sur la figure 2.34 b. La photographie 2.35 a, de l'échantillon pris à 5 m de profondeur montre bien des grains de sable.

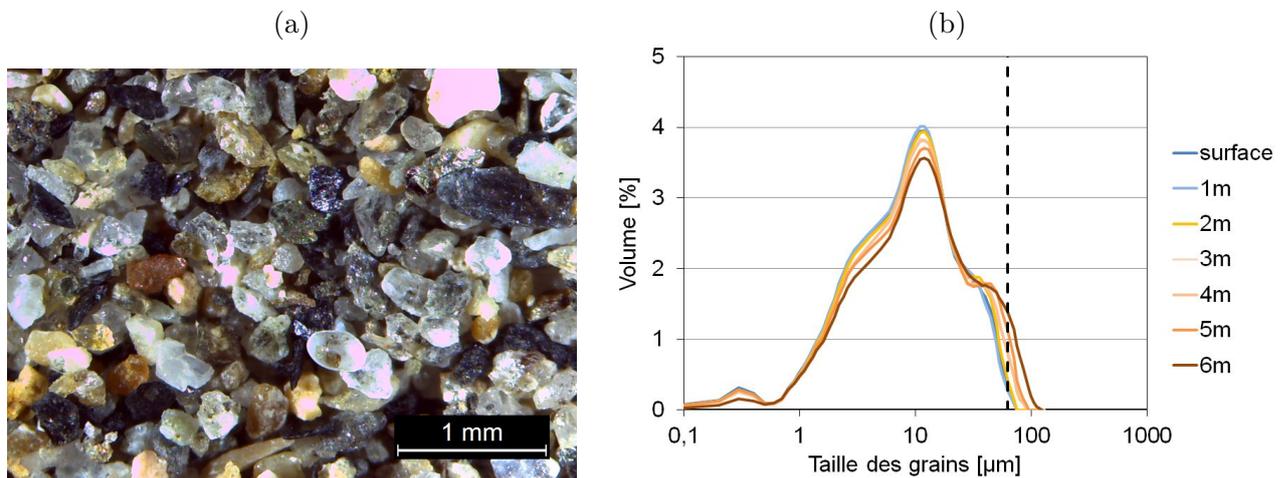


FIGURE 2.35. Le Rhône à Port-Saint-Louis-du-Rhône le 23 novembre 2016 : photographie des sables en suspension à 5 m de profondeur (a), distribution granulométrique des MES totales aux différentes profondeurs explorées (le trait vertical pointillé noir représente la limite de $63 \mu\text{m}$) (b).

On a donc mis en évidence lors de cette crue la présence de sable en suspension dans le Rhône à son exutoire, en particulier à proximité du fond. Cette campagne de mesures, n'a pas permis d'apporter toutes les informations espérées en terme de flux, mais elle est une étape dans la construction

de la stratégie d'échantillonnage et d'analyse des sables pour le calcul du débit de sable mis au point ensuite dans ce travail de thèse.

Calcul d'un premier bilan de flux de sable en suspension lors d'une crue du Rhône à Lyon Perrache

Introduction

Dans cette partie la mise en œuvre des courbes de tarage de sable en suspension est testée pour différents exemples de grands cours d'eau. Les jaugeages solides de sable utilisés pour vérifier la cohérence de cette approche sont réalisés avec des techniques de prélèvement mobile associant exploration de la section par échantillonnage distribué à l'aide de préleveurs horizontaux et mesures ADCP. Les protocoles utilisés, le détail des campagnes de mesure et les étapes de calcul du jaugeage solide sont décrits dans la thèse de [Dramais \(2020a\)](#).

Deux approches sont testées sur le Rhône à Perrache : l'une, à base physique par un simple ajustement de loi puissance aux mesures réalisées, la seconde, avec base physique, grâce à l'établissement d'une courbe de transport par capacité. Enfin, nous testerons la faisabilité de l'utilisation de l'outil d'analyses bayésiennes BaM! pour estimer les courbes les plus vraisemblables et leurs intervalles d'incertitude. Cette approche va permettre de combiner l'approche à base physique (avec des a priori sur les paramètres) avec les observations (en tenant compte des incertitudes). Ainsi un premier bilan de flux de sable à Perrache sera calculé pour les crues de janvier 2018.

3.1 Courbes de tarage sédimentaires

La question que l'on se pose ici est donc de savoir comment utiliser les mesures de concentration, les jaugeages solides, l'hydraulique et les paramètres physiques du cours d'eau pour construire des bilans de flux de sable à l'échelle d'un événement ou d'une période. La relation entre le débit solide et le débit liquide (ou un ou plusieurs autres paramètres mesurés en continu) peut s'exprimer comme une courbe moyenne qu'on appellera courbe de tarage sédimentaire, souvent représentée en échelle logarithmique pour être plus lisible. Ces courbes seront utilisées pour extrapoler les flux de sédiments entre les périodes de mesures ponctuelles de concentration ou de jaugeage solide qui ne sont pas continues sur la plupart des stations. Les courbes de tarage sédimentaires sont basées sur une relation directe entre la concentration et le débit liquide, ou une loi par capacité de transport. Elles sont parfois difficiles à obtenir surtout en présence de tailles de particules variables. Elles restent cependant utilisées pour estimer des flux moyens de MES fines, avec l'hypothèse qu'il existe un équilibre global sur le bassin versant entre les flux liquides et solides. Pour les fines, on considère une capacité de transport quasi infinie. Pour le sable, des courbes par capacité de transport basées

sur des lois semi-empiriques existent et vont permettre d'estimer la capacité théorique d'un transect ou d'un tronçon à transporter le sable en suspension ; ces courbes pourront ensuite être ajustées ou comparées à des mesures de jaugeage solide.

3.1.1 Relations directes entre concentration et débit

“La relation entre le flux de sédiments et les caractéristiques des particules, du bassin versant et du débit liquide est complexe en raison du grand nombre de paramètres en jeu. Ces variables interagissent de façon complexe et sont difficiles à simplifier. Dans une section de cours d'eau, on peut considérer que le flux de sédiments va dépendre de la profondeur, de la largeur, de la vitesse, de la pente d'énergie, de la température et de la turbulence ; mais aussi de la taille, de la densité, de la forme et de la cohésion des particules. Au delà de la section, le flux va dépendre aussi de la disponibilité et des apports de sédiment en amont, de la géologie du bassin, des conditions météorologiques, de la topographie, de l'usage des sols, de la couverture végétale du bassin. Il est donc très difficile, voire impossible, d'obtenir des expressions mathématiques simples et satisfaisantes pour modéliser tous ces paramètres.” déclarait Colby (1964).

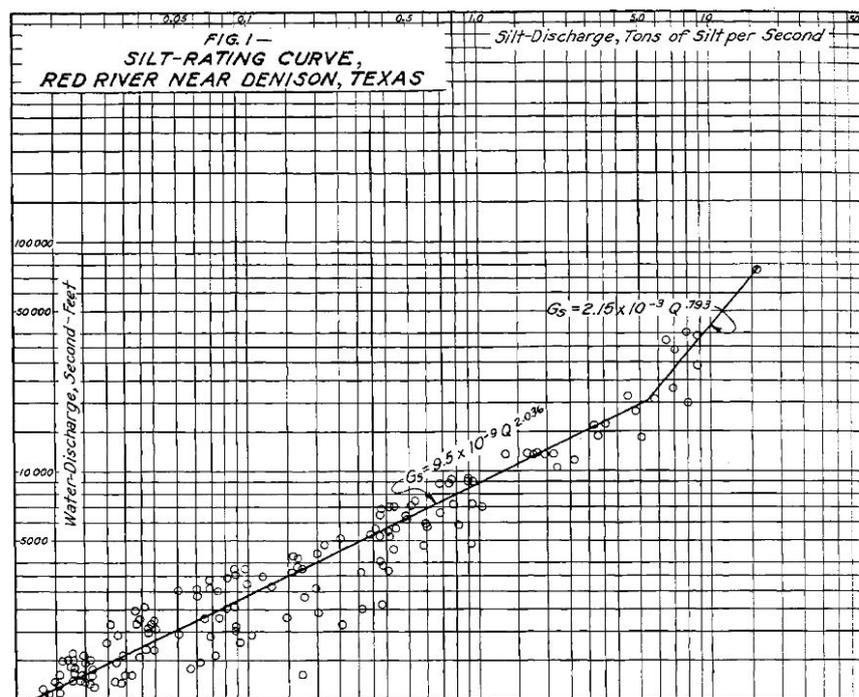


FIGURE 3.1. Probablement l'une des premières relations entre le débit liquide et le débit solide de fines sur la Red River à Denison au Texas entre 1930 et 1940 (Campbell et Bauder, 1940)

Les courbes de tarage sédimentaires (Campbell et Bauder, 1940) vont d'abord être appliquées sur les flux de sédiments fins et vont permettre d'approcher une corrélation moyenne entre le débit solide en suspension ou la concentration en MES et une autre grandeur physique mesurée dans la rivière (débit liquide, hauteur d'eau).

Ces relations sont souvent déterminées par des régressions linéaires avec la méthode des moindres carrés entre le logarithme de la concentration et celui du débit liquide. Bien que cette courbe de tarage $\log(C)/\log(Q)$ soit un résultat empirique sans justification physique, elle est largement utilisée.

Certains auteurs ont ajusté des polynômes du second degré (Serrat *et al.*, 2001) ou des combinaisons par segments de lois puissance, comme proposé par Campbell et Bauder (1940), (cf. Figure 3.1) et repris notamment par Poulier *et al.* (2019).

L'équation reliant la concentration en MES $\overline{C_s}$ au débit liquide Q_w est généralement écrite sous la forme d'une loi puissance :

$$\overline{C_s} = a Q_w^b \quad (3.1)$$

avec a et b des coefficients dépendant du site étudié (Pont *et al.*, 2002).

Sur le Rhône, Pont *et al.* (2002) et Ollivier *et al.* (2010) ont également utilisé des lois puissance pour calculer flux et bilans annuels sur le bassin versant. Ce type de relation est utilisé pour quantifier les volumes de sédiments fins transportés, la signification physique des coefficients (a et b) de ces relations est discutée dans la littérature pour les lier à la pente ou à des indicateurs d'érosion du bassin versant (Walling, 1977; Asselman, 2000; Moatar *et al.*, 2013). Cependant plusieurs auteurs ont montré aussi qu'une erreur de sous-estimation, pouvant dépasser 50%, peut affecter les bilans de flux utilisant cette méthode (Thomas, 1985; Ferguson, 1986; Cohn *et al.*, 1989). Ce biais est lié au fait d'appliquer une régression dans l'espace logarithmique (Ferguson, 1986; Grasso et Jakob, 2003), de plus le fait d'avoir davantage de données pour des conditions de flux faible à moyen donne plus de poids aux valeurs basses qui vont influencer sur la régression, d'où l'utilisation dans de nombreux cas d'une combinaison de deux lois puissance. Quelques chercheurs ont proposé l'utilisation de facteurs de correction du biais (Glysson, 1987; Walling, 1988).

Plus récemment, des méthodes utilisant les classes de débit plutôt que les débits ont été testées avec succès en Suisse (Grasso et Jakob, 2003; Launay *et al.*, 2019b) ainsi que sur le Rhône et les fleuves côtiers méditerranéens (Sadaoui *et al.*, 2016) avec pour cette dernière étude des résultats en terme de flux annuel un peu plus élevés que dans d'autres études (Launay, 2014). Poulier *et al.* (2019) a également utilisé la méthode des débits classés mais l'ajustement des régressions a été effectué à l'aide d'une méthode bayésienne (Le Coz *et al.*, 2014). Cette approche évite la transformation en logarithme traditionnellement utilisée et détecte automatiquement le débit de transition entre les deux segments de la relation et les coefficients de régression de la courbe de tarage. Les estimations du débit de transition, et des paramètres a et b de chaque segment des courbes de tarage sont calculées à l'aide du logiciel BaRatinAGE, qui nécessite peu d'informations a priori sur les valeurs des paramètres.

De nombreux auteurs remettent en cause les approches de courbes de tarage sédimentaires pour modéliser les sédiments transportés. Certains constatent de grandes variations de concentrations pour un même débit. Par exemple, sur le Rhône à Lyon, une étude entre 1983 et 1987 (CNR, 1989) fait état de flux de sédiments qui varient dans un rapport de 4 pour un même débit liquide, en fonction de l'origine de la crue. Dans la même étude, les auteurs constatent que la granulométrie des particules en suspension augmente avec le débit, jusqu'à 200 μm .

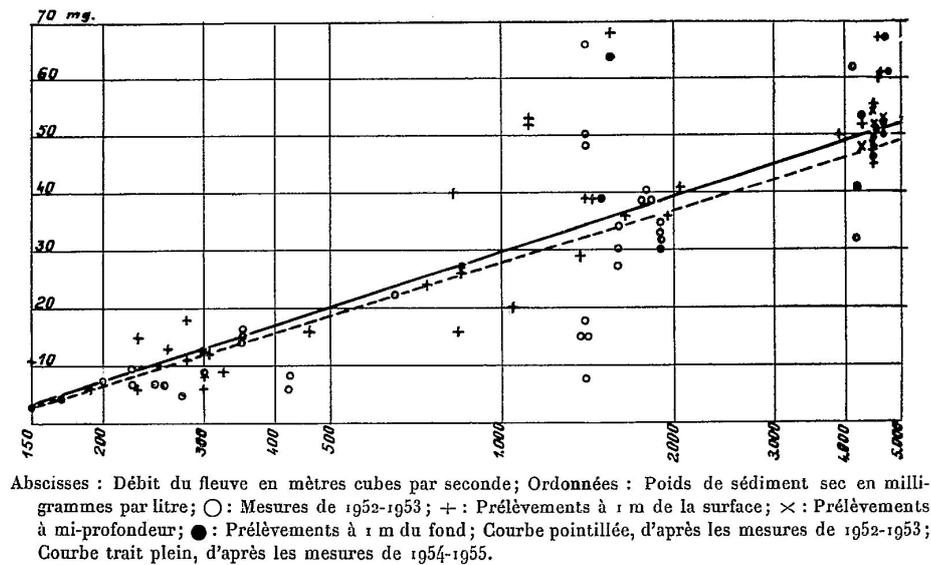


FIGURE 3.2. Relation entre le débit liquide et la concentration en MES sur la Loire à Mauves-sur-Loire en 1954 (Berthois, 1955)

Les courbes de tarage sédimentaires peuvent s'avérer être un outil intéressant surtout dans le cas d'un bon mélange des sédiments dans la colonne d'eau, ce qui est malheureusement rarement le cas lors des crues. Walling (1977) estime les erreurs de ces relations à $\pm 50\%$, parfois plus. La disparité des méthodes de prélèvement, leur fréquence, l'analyse au laboratoire sont autant de sources d'erreurs potentielles. La figure 3.2 présente un exemple ancien de courbe de tarage sédimentaire simple sur la Loire à Mauves-sur-Loire entre 1953 et 1955, la variabilité de la concentration en fonction du débit est mise en évidence, tout comme la variabilité de la concentration en fonction de la profondeur du prélèvement. Launay *et al.* (2019b) comparent la méthode de calcul des flux par courbe de tarage sédimentaire à deux segments (Poulier *et al.*, 2019) à une approche par la méthode des débits classés (Grasso et Jakob, 2003) sur l'Arve. Ils remettent en question la fréquence d'échantillonnage et la méthode de calcul par la méthode des débits classés et réévaluent les flux de MES avec toujours une incertitude sur la prise en compte ou pas de la suspension graduée de sable dans les études et les analyses précédentes.

3.1.2 Établissement d'une relation simple sur le Rhône à Lyon Perrache

Pour construire une relation entre débit solide de sable en suspension et débit liquide, il est nécessaire de disposer d'un jeu de données qui couvre une gamme étendue de conditions hydrauliques. Dans cet exemple, on va utiliser les résultats de jaugeages solides à Perrache (2017-2020) qui sont présentés dans le tableau 3.1.

Date	Débit liquide [m ³ /s]	Débit de sable [kg/s]		
		Méthode Normalisée	Méthode Nearest neighbour	Méthode SDC
13 décembre 2017	1479	35	34	33
05 janvier 2018 (matin)	2190	269	253	278
05 janvier 2018 (ap. midi)	2220	198	194	222
22 janvier 2018	2002	94	100	102
23 janvier 2018	2647	432	438	464
24 janvier 2018	2744	340	337	347
25 janvier 2018	2152	75	80	85
12 juin 2018	856	3,7	3,6	2,6
06 mars 2020	1783	83	95	105

TABLE 3.1. Résultats de calcul de flux de sable par les différentes méthodes de calcul du jaugeage solide testées dans la thèse de [Dramais \(2020a\)](#) pour le Rhône à Perrache.

La figure 3.3 montre deux exemples de représentation des jaugeages solides par le code *SDC*. La méthode *SDC* qui comporte une description physique des phénomènes proches du fond et la prise en compte de la résolution spatiale des mesures de vitesse ADCP nous donne donc des résultats cohérents en termes de flux de sable avec la méthode normalisée et simplifiée *NN*.

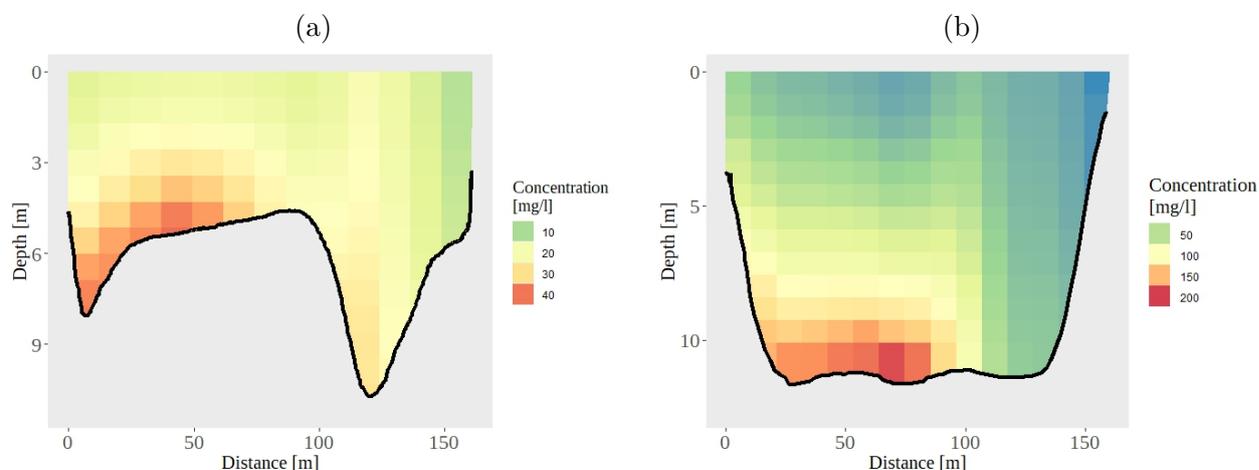


FIGURE 3.3. Distribution des concentrations en sable dans les sections sur le Rhône à Perrache, calculées par le code *SDC* : Transect amont le 13 décembre 2017 (a), Transect aval le 06 mars 2020 (b).

Pour estimer la relation entre débit solide de sable en suspension et le débit liquide, on peut dans un premier temps tester l'ajustement simple d'une loi puissance sur les valeurs des jaugeages solides selon l'équation suivante :

$$\Phi = a Q_w^b \quad (3.2)$$

avec Φ le flux de sable en suspension en [kg/s] et $a = 5 \times 10^{-13}$ et $b = 4,361$ des coefficients dépendant du site et de l'évènement étudié (cf. Figure 3.4).

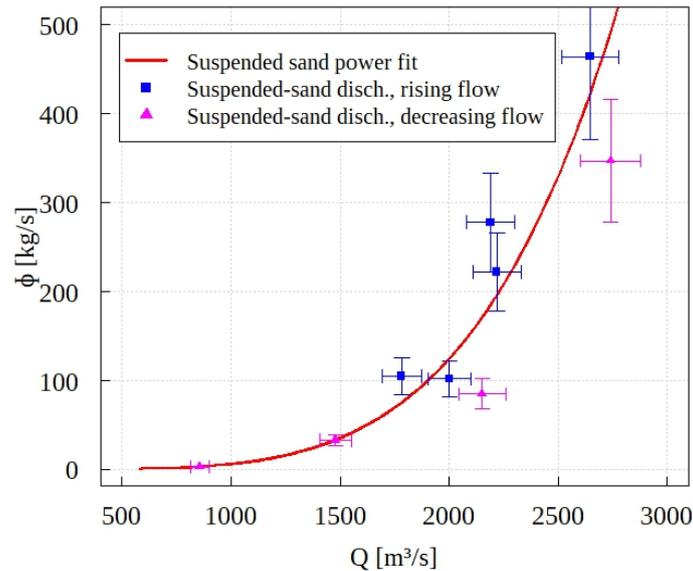


FIGURE 3.4. Ajustement d’une loi puissance sur les valeurs de flux de sable en suspension mesurées sur le Rhône à Lyon Perrache par la méthode *SDC*.

Pour la figure 3.4, on va faire l’hypothèse d’une incertitude de $\pm 20\%$ sur les valeurs de jaugeages solides, cette estimation semble cohérente (pour le Rhône) avec les écarts observés entre les méthodes de calcul de jaugeages solides testées dans la thèse de [Dramais \(2020a\)](#). Cependant cette estimation reste arbitraire et une évaluation des incertitudes devra par la suite être propagée jusqu’aux résultats des jaugeages solides. Cette incertitude forfaitaire de $\pm 20\%$ sur les jaugeages solides est représentée sur chacun des autres graphiques de ce chapitre.

L’ajustement représenté sur la figure 3.4, s’il n’a aucune base physique, permet tout de même de se rendre compte d’une organisation cohérente des points. En étudiant plus précisément les phases de montée et descente de crue pendant lesquelles les jaugeages solides ont été réalisés, on peut suspecter une hystérésis comme le montrent les données de la figure 3.4. Cependant, il sera nécessaire de compléter le jeu de données avec d’autres jaugeages solides avant de pouvoir confirmer une telle hypothèse. Si cela se confirme, la modélisation de tels effets d’hystérésis rajoutera une difficulté supplémentaire pour la quantification des bilans de flux car les effets dynamiques ne sont pas inclus dans les modèles de courbes de tarage sédimentaire appliqués ici.

3.2 Courbe de capacité de transport

La capacité de transport d’une section de cours d’eau va dépendre de l’hydraulique locale et des apports amont. Sur un tronçon de cours d’eau non homogène, on peut faire l’hypothèse que c’est le transect qui a la plus faible capacité de transport qui va imposer la capacité du tronçon. Une capacité de transport donnée ne signifie pas que le transport réel atteindra cette capacité. En effet, si le sédiment n’est pas disponible, la capacité théorique du transect ne sera pas forcément atteinte.

3.2.1 Méthodologie pour l'établissement d'une courbe de tarage sédimentaire par capacité

Pour calculer le débit solide de sable, on peut donc utiliser une formule de capacité de transport. Parmi ces formules, on va ici utiliser les formules de [Camenen et Larson \(2008\)](#) et d'[Engelund et Hansen \(1967\)](#). Ces formules permettent de calculer le flux de sable en suspension, elles sont basées sur des approches semi-empiriques et ont été testées à plusieurs reprises sur différents cours d'eau. La formule de [Camenen et Larson \(2008\)](#), a notamment été appliquée dans le cadre de campagnes de mesures sur le Mékong ([Camenen et al., 2014b](#)), l'Arc-en-Maurienne ([Camenen et al., 2018](#)), l'Isère ([Camenen et al., 2019b](#)), le Colorado ([Camenen et al., 2019a](#)), l'Amazone ([Camenen et al., 2014a](#); [Armijos et al., 2020](#)).

Cette approche est basée sur l'ajustement d'une courbe de tarage classique (hauteur-débit liquide) appliquée sur chaque section grâce aux valeurs des jaugeages liquides disponibles ([Camenen et al., 2014b](#); [Armijos et al., 2020](#)). Il est indispensable de connaître également la bathymétrie de la section dans le même repère d'altitude que celui de la courbe hauteur-débit liquide. Cela permet d'estimer les principaux paramètres hydrauliques comme la surface mouillée, le rayon hydraulique, la vitesse moyenne et la vitesse de cisaillement dans la section. Des mesures des formes de fond et de la distribution granulométrique des matériaux transportés permettent d'affiner l'estimation des différents paramètres et notamment la rugosité et la contrainte de cisaillement.

Cette méthodologie va être appliquée sur plusieurs sites et va être comparée aux résultats de la méthode *SDC*. Conformément à la méthode proposée dans la thèse de [Dramais \(2020a\)](#), chaque valeur de flux de sable est la moyenne de 4 à 6 transects ADCP exploités avec le code *SDC*.

3.2.2 Application au Rhône à Lyon Perrache

Pour l'application de la méthodologie de calcul des courbes de tarage sédimentaire par capacité de transport sur le site de Perrache, on dispose d'un jeu de jaugeages solides récent. Une première application de la formule a été effectuée dans le cadre de cette thèse et présentée à la conférence de l'AGU (American Geophysical Union) à Washington en 2018 ([Dramais et al., 2018b](#)). Une des grandes difficultés de l'application de ces formules sur le Rhône à Perrache est liée à l'influence du barrage de Pierre-Bénite dont le remous se propage en amont dans la traversée de Lyon alors qu'on fait l'hypothèse d'un écoulement quasi-uniforme.

Les formules de transport de [Camenen et Larson \(2008\)](#) et [Engelund et Hansen \(1967\)](#) sont testées sur deux transects et les résultats sont comparés aux flux de sable issus de la méthode *SDC*. Les mesures du 5 janvier 2018 ont été réalisées juste en aval du pont Pasteur, qui comporte trois arches (cf. Figure 3.5). La présence du pont explique sans doute la forme particulière de la section la plus proche du pont (cf. Figure 3.3 a).

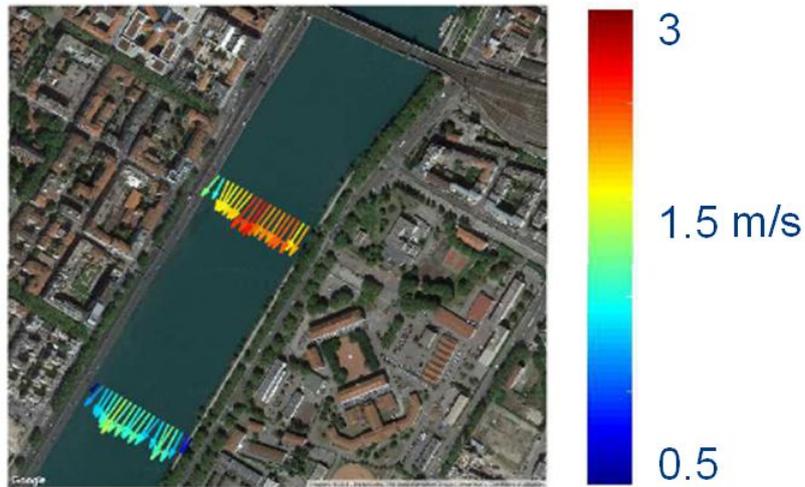


FIGURE 3.5. Représentation des vitesses ADCP moyennées sur la verticale de deux campagnes sur le Rhône à Perrache, image de fond Google.

Les autres jaugeages solides ont été réalisés quelques centaines de mètres plus en aval (cf. Figure 3.5) sur une section à la géométrie plus simple et au champ de vitesse moins perturbé (cf. Figure 3.3 b).

Il est intéressant de tester les formules de transport par capacité sur les deux transects explorés dont les conditions d'écoulement sont différentes. La capacité de transport calculée est ensuite comparée aux 9 jaugeages solides effectués entre décembre 2017 et mars 2020 (cf. Figures 3.6). Ces jaugeages solides vont permettre de vérifier la cohérence des valeurs prédites par les courbes de tarage sédimentaire par capacité de transport de sable. Ces courbes pourront ensuite permettre d'effectuer des bilans évènementiels sur des périodes données et pour différentes conditions d'écoulement (si la capacité de transport est atteinte).

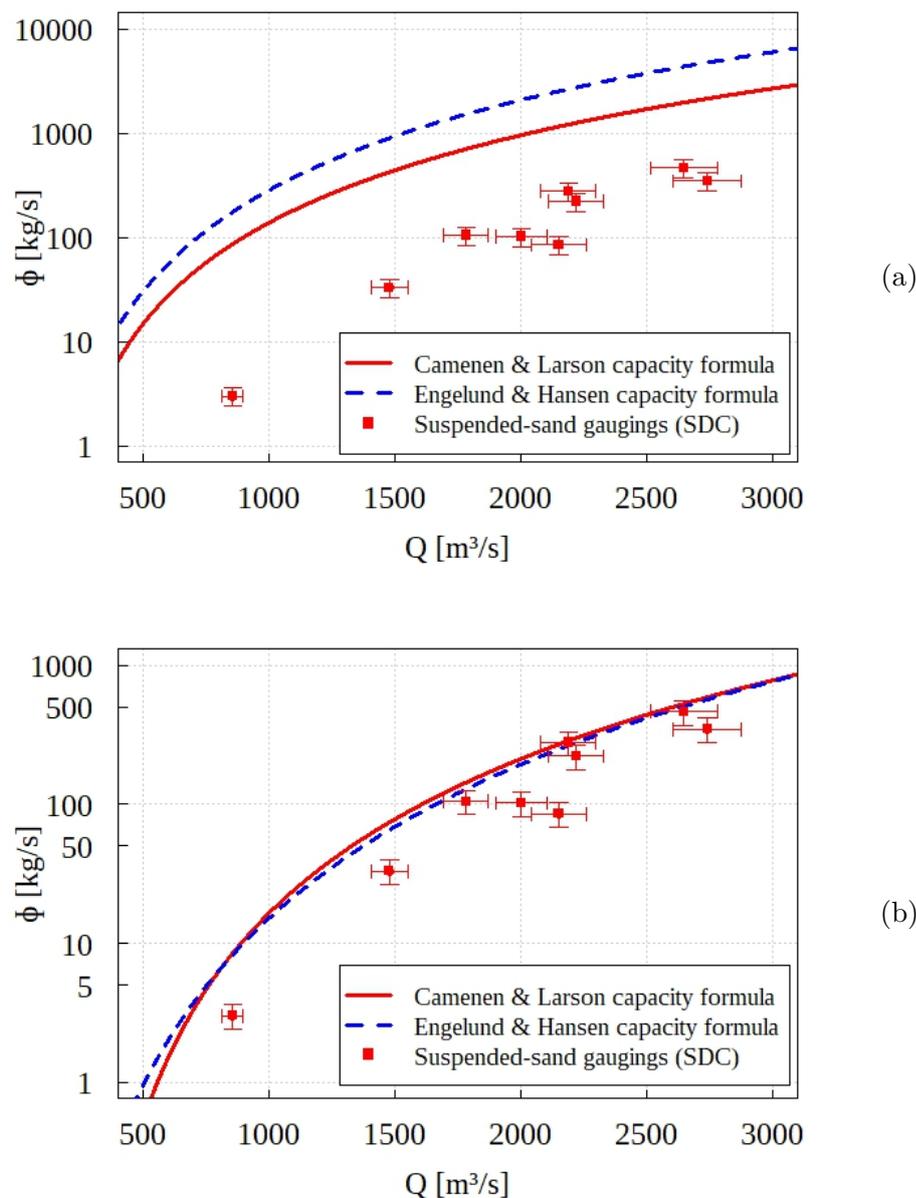


FIGURE 3.6. Relations entre le débit liquide et le débit solide de sable en suspension sur le Rhône à Lyon Perrache, selon les formules de [Camenen et Larson \(2008\)](#) (ligne rouge) et [Engelund et Hansen \(1967\)](#) (ligne tiretée bleue). Les points rouges sont les résultats de jaugeages solides calculés en appliquant la méthode *SDC*. Transect amont (a), transect aval (b).

Sur le transect amont (cf. Figure 3.3 a), la capacité de transport n'est pas atteinte lors des jaugeages solides (cf. Figure 3.6), elle l'est pour le transect aval (cf. Figure 3.6). Sur le transect aval (cf. Figure 3.3 b), la capacité de transport est quasiment atteinte pour tous les jaugeages solides. Si le contrôle hydraulique de ce tronçon pour la relation hauteur-débit liquide est assuré par le chenal (en condition de crue), le transport de sable en suspension semble contrôlé par la section aval. En effet, on voit que la capacité de transport est atteinte pour le transect aval et qu'il contrôle donc le transport dans ce tronçon. Ce résultat met en évidence l'importance du choix de la section

représentative du transport effectif pour établir une courbe par capacité, qui permette d'évaluer le transport du sable en suspension. On constate cependant une dispersion non négligeable des valeurs issues des observations autour de la courbe. Les incertitudes de cette estimation de la capacité de transport ainsi que celles des observations seront à évaluer pour aller plus loin et permettre le calcul de bilans avec incertitudes associées.

3.3 Établissement d'une courbe de tarage sédimentaire avec incertitudes

Dans cette partie, nous allons tester la faisabilité d'une analyse des incertitudes combinant les observations de jaugeages solides sur le Rhône à Perrache et des modèles simplifiés de transport du sable en suspension par capacité, grâce à l'outil *BaM!* (Renard *et al.*, 2015; Mansanarez *et al.*, 2019; Le Coz *et al.*, 2014). Cette étude a nécessité un certain nombre d'hypothèses et de simplifications que l'on va détailler ici. On va estimer ici deux exemples de courbes de tarage de sable en suspension sur le Rhône à Perrache, exprimées sous forme d'un grand échantillon de 5000 courbes de tarage vraisemblables (après sous-échantillonnage des tirages MCMC), permettant de calculer l'enveloppe d'incertitude au niveau de confiance souhaité (en général 95%). Dans les deux cas traités, on obtient une estimation de la relation permettant de calculer le débit de sable en suspension assorti de cette incertitude.

3.3.1 Expression du modèle de débit de sable en suspension

Le débit total de sable en suspension Φ [kg/s] dans la section est alors exprimé grâce à la formule de transport. Les calculs ci-dessus sont exprimés en flux par unité de largeur, q_{ss} en [m³/m/s]. Pour obtenir le flux massique en suspension en [kg/s] on doit estimer une largeur active W_a sur laquelle le transport solide est actif tel que :

$$\Phi = \rho_s W_a q_{ss} \quad (3.3)$$

avec q_{ss} le flux solide en suspension en m³/s par unité de largeur.

On va ensuite chercher à implémenter un modèle dans *BaM!*. Chacun des paramètres du modèle est noté θ_i et est à estimer avec un intervalle de confiance (certains θ_i vont regrouper plusieurs paramètres). Quel que soit le modèle utilisé dans *BaM!*, l'équation doit comporter une ou plusieurs variables d'entrée, une variable de sortie et des paramètres à estimer avec leurs a priori. Dans notre cas, la variable à calculer en sortie est le débit de sable en suspension Φ , les variables d'entrée vont être une hauteur d'eau à la station ou sur le tronçon, le débit liquide, ou une combinaison des deux.

3.3.2 Expression d'une courbe de tarage de sable en suspension sans base physique

On s'inspire ici des travaux sur les courbes de tarage en hydrométrie qui représentent la relation entre la hauteur d'eau et le débit d'un cours d'eau au droit d'une station hydrométrique (Hersch, 2002). Ces courbes peuvent également avoir une base physique. L'un des modèles les plus répandus pour établir cette relation est une relation puissance de la forme :

$$Q_w = a (z_w - z_0)^b \quad (3.4)$$

avec z_w la hauteur mesurée et z_0 la hauteur correspondant au débit nul, a et b sont ici des paramètres qui dépendent du type de contrôle hydraulique et des conditions d'écoulement du site.

Dans notre cas, pour établir un modèle de courbe de tarage du sable en suspension, on va considérer un modèle empirique de ce type, couramment utilisé pour quantifier les flux de sédiments fins. Les paramètres de ce modèle n'auront pas de signification physique. Ce modèle est une première approche, nous utiliserons par la suite des modèles plus complexes. On fait ici simplement l'hypothèse d'un modèle de transport du sable en suspension avec le débit liquide en entrée, de la forme :

$$\Phi = \theta_1 (Q - \theta_2)^{\theta_3} \quad (3.5)$$

avec θ_1 , θ_2 et θ_3 les paramètres à déterminer.

On va représenter les a priori sur les paramètres comme des distributions statistiques dans lesquelles on va tirer au sort des valeurs des paramètres et calculer des réalisations du modèle pour chaque combinaison de paramètres. En l'absence de connaissance sur ces paramètres, on fixe des gammes de valeurs vraisemblables par expertise qui vont être choisies pour obtenir un compromis entre des valeurs de débit solide réalistes et un temps de calcul acceptable. Les lois de distribution statistiques choisies dans ce cas, sont des lois uniformes. Ces lois uniformes vont laisser une grande liberté au modèle pour converger vers des valeurs vraisemblables, tout en empêchant d'aller dans des gammes de valeurs irréalistes. Ces lois donnent peu d'informations sur la valeur du paramètre. Dans ce cas-là, les a priori sur les paramètres sont très larges, ce sont les valeurs des observations qui vont être prépondérantes dans l'ajustement du modèle (cf. Tableau 3.2). Ce modèle sans base physique, représenté avec ses intervalles d'incertitude (cf. Figure 3.7) permet ensuite de prédire des bilans de flux assortis d'incertitudes en utilisant l'hydrogramme mesuré à la station de Lyon Perrache.

Paramètre	θ_1	θ_2	θ_3
Valeur	5×10^{-6}	500	2.5
Loi uniforme	$[0; 1 \times 10^{-5}]$	[200 ; 900]	[1 ; 5]

TABLE 3.2. Paramètres, valeurs et intervalles des distributions du modèle empirique.

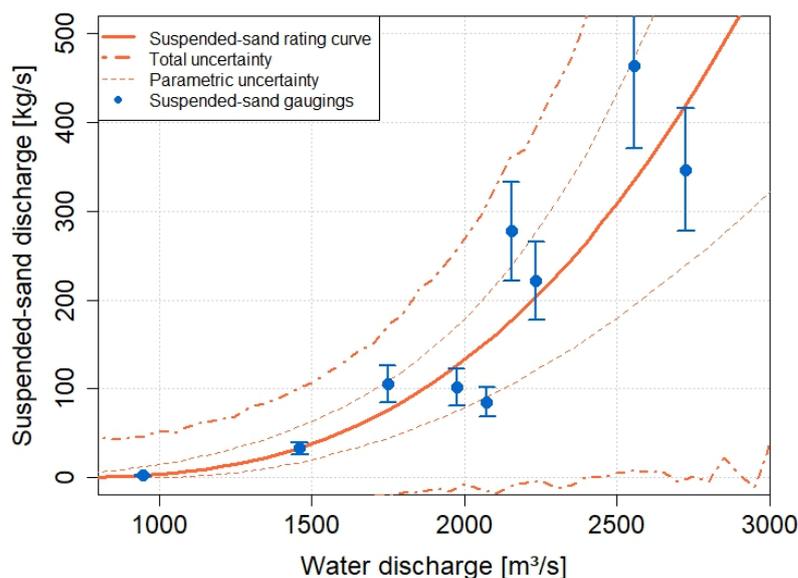


FIGURE 3.7. Relation représentant le débit solide de sable en suspension en fonction du débit liquide sur le Rhône à Lyon Perrache par une relation empirique. Les incertitudes paramétriques et totales au niveau de probabilité de 95% sont affichées en pointillé. Les points sont les jaugages solides mesurés entre décembre 2017 et mars 2020.

L'incertitude est ici décomposée en trois estimations :

- L'incertitude paramétrique liée à l'estimation des paramètres du modèle, est calculée en fonction des a priori sur ces paramètres et du contenu d'information des observations (jaugages solides).
- L'incertitude structurelle va estimer les limites de l'équation du modèle à décrire le phénomène physique que l'on cherche à représenter. Cette incertitude peut être très importante notamment en l'absence de base physique ou plus généralement, lorsque le modèle est trop simple pour décrire un phénomène complexe.
- Enfin, l'incertitude totale est la combinaison des incertitudes paramétriques et structurelles.

3.3.3 Expression d'une courbe de tarage de sable en suspension avec base physique

3.3.3.1 Débit, hauteur d'eau et paramètres associés

Dans le cas d'un modèle à base physique implémenté dans *BaM!*, celui-ci va aussi dépendre d'un certain nombre de paramètres : des constantes liées à l'équation de base (g , ρ , ρ_s) et des grandeurs et variables liées à l'hydraulique ou aux conditions du site comme le d_{50} , le rayon hydraulique, la contrainte de cisaillement, le paramètre de Shields ou le coefficient de Strickler.

Le transect de référence pour lequel le débit de sable en suspension est estimé est simplifié en une section rectangulaire de largeur W_R et d'altitude b_R , une approximation du rayon hydraulique est alors $R_h = z_w - b_R$ avec z_w l'altitude de la cote de l'eau, qui est une entrée du modèle. Ce transect de référence est considéré comme représentatif du tronçon étudié et doit en contrôler la capacité de transport.

La contrainte de cisaillement au fond τ est exprimée en fonction de la vitesse moyenne dans la section en utilisant la formule de Manning-Strickler :

$$\tau = \frac{\rho g U^2}{K^2 R_h^{1/3}} \quad (3.6)$$

avec $U = Q_w/S_w = Q_w/[W_R(z_w - b_R)]$ et $R_h = z_w - b_R$ on obtient :

$$\tau = \frac{\rho g Q_w^2}{K^2 W_R^2 (z_w - b_R)^{7/3}} \quad (3.7)$$

Dans notre cas, les débits liquides sont disponibles et sont considérés comme la deuxième entrée du modèle. Dans le cas contraire, ils peuvent être calculés grâce à une courbe de tarage dans une section de jaugeage, qui peut éventuellement être différente de la section de référence.

Trois situations sont alors envisageables pour écrire le modèle et exprimer les paramètres nécessaires à *BaM!* :

1. Q_w et z_w sont les entrées du modèle.
2. $Q_w(z_Q) = S_w K \sqrt{S_0} R_h^{2/3} \approx K \sqrt{S_0} W_Q (z_Q - b_Q)^{5/3}$ (avec S_w la surface mouillée qui est calculée d'après le contrôle hydraulique d'un chenal rectangulaire de largeur W_Q avec d'altitude b_Q).
3. $Q_w(z_Q) = C_Q \sqrt{2g} W_Q (z_Q - b_Q)^{3/2}$ est calculé à partir d'une section de contrôle rectangulaire (un seuil dans notre cas, celui de Villeurbanne) de largeur W_Q avec b_Q l'altitude de la crête du seuil et avec C_Q le coefficient de débit du seuil rectangulaire (0,4 par défaut).

Dans ces deux dernières situations, la deuxième entrée du modèle est z_Q , la cote à la station hydrométrique qui peut être différente de z_w (si elle est placée en amont du seuil par exemple).

Pour ces trois cas, on exprime alors les paramètres suivants : la rugosité de peau τ' , le paramètre de Shields θ' et la vitesse de cisaillement u'_* associés :

1. Premier cas avec Q_w et z_w comme entrées du modèle :

$$\tau \approx \frac{\rho g Q_w^2}{K^2 W_R^2 (z_w - b_R)^{7/3}} \quad (3.8)$$

$$\theta \approx \frac{Q_w^2}{(s-1) d_{50} K^2 W_R^2 (z_w - b_R)^{7/3}} \quad (3.9)$$

$$u_* \approx \frac{Q_w \sqrt{g}}{K W_R (z_w - b_R)^{7/6}} \quad (3.10)$$

avec $s = \rho_s/\rho$.

2. Second cas avec z_Q comme entrée du modèle et avec un contrôle par le chenal :

$$\tau \approx \rho g S_0 \frac{W_Q^2 (z_Q - b_Q)^{10/3}}{W_R^2 (z_w - b_R)^{7/3}} \quad (3.11)$$

$$\theta \approx \frac{S_0}{(s-1) d_{50}} \frac{W_Q^2 (z_Q - b_Q)^{10/3}}{W_R^2 (z_w - b_R)^{7/3}} \quad (3.12)$$

$$u_* \approx \sqrt{g S_0} \frac{W_Q (z_Q - b_Q)^{5/3}}{W_R (z_w - b_R)^{7/6}} \quad (3.13)$$

3. Troisième cas avec z_Q comme entrée du modèle et avec un contrôle par la section :

$$\tau \approx \frac{\rho 2g^2 C_Q^2 W_Q^2 (z_Q - b_Q)^3}{K^2 W_R^2 (z_w - b_R)^{7/3}} \quad (3.14)$$

$$\theta \approx \frac{2g C_Q^2 W_Q^2 (z_Q - b_Q)^3}{(s-1) d_{50} K^2 W_R^2 (z_w - b_R)^{7/3}} \quad (3.15)$$

$$u_* \approx \frac{C_Q W_Q g \sqrt{2} (z_Q - b_Q)^{3/2}}{K W_R (z_w - b_R)^{7/6}} \quad (3.16)$$

3.3.3.2 Implémentation de la formule de Engelund & Hansen, 1967)

On va ici implémenter la formule d'Engelund et Hansen (1967). Cette formule est simple et adaptée à l'estimation du transport total de sable (et permet aussi d'estimer la suspension). Après simplification de la formule de Engelund et Hansen (1967) on obtient les équations suivantes :

1. Premier cas avec Q et z_w comme entrées du modèle :

$$\Phi(z_w, Q_w) = \frac{0.05 \rho_s W_a}{g^{0.5} d_{50} (s-1)^2 K^3 W_R^5} \frac{Q_w^5}{(z_w - b_R)^{5.5}} \quad (3.17)$$

2. Second cas avec z_Q comme entrée du modèle et avec un contrôle par le chenal :

$$\Phi(z_w, z_Q) = \frac{0.05 \rho_s W_a K^2 S_0^{5/2} W_Q^5}{g^{0.5} d_{50} (s-1)^2 W_R^5} \frac{(z_Q - b_Q)^{25/3}}{(z_w - b_R)^{5.5}} \quad (3.18)$$

3. Troisième cas avec z_w et z_Q comme entrée du modèle et avec un contrôle par la section :

$$\Phi(z_w, z_Q) = \frac{0.05 \times 2^{2.5} \rho_s W_a K^2 g^2 C_Q^5 W_Q^5}{d_{50} (s-1)^2 W_R^5} \frac{(z_Q - b_Q)^{7.5}}{(z_w - b_R)^{5.5}} \quad (3.19)$$

Avec *BaM!*, les différents modèles à estimer avec leurs paramètres deviennent :

1. Premier cas avec Q_w et z_w comme entrées du modèle :

$$\Phi(z_w, Q_w) = \theta_1 \frac{Q_w^{\theta_2}}{(z_w - \theta_3)^{\theta_4}} \quad (3.20)$$

2. Second et troisième cas avec z_Q comme entrée du modèle :

$$\Phi(z_w, z_Q) = \theta_1 \frac{(z_Q - \theta_2)^{\theta_3}}{(z_w - \theta_4)^{\theta_5}} \quad (3.21)$$

On peut alors estimer des a priori sur les paramètres et utiliser ces modèles pour une analyse avec l'outil *BaM!*. Pour le cas du Rhône à Perrache, on va utiliser le premier cas avec Q et z_w comme entrées du modèle. Les autres cas n'ont pas été testés du fait des difficultés liées à la présence du barrage de Pierre-Bénite qui contrôle les écoulements sur ce tronçon. L'utilisation du jeu de données de jaugeages solides du Rhône à Perrache permet d'affiner le calcul d'incertitude en prenant en compte une incertitude sur ces observations. Les a priori des paramètres du modèle sont définis très larges, ainsi que leurs incertitudes (cf. Tableau 3.3). Ce sont donc les valeurs des observations qui vont être prépondérantes dans l'ajustement du modèle.

Les incertitudes des paramètres θ_1 , θ_2 et θ_4 sont tirées au sort dans des intervalles de crédibilité représentés par des lois gaussiennes. L'incertitude de θ_3 qui est l'altitude du fond de la section de

Paramètre	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
Valeur	$7,7 \times 10^{-9}$	5	150	5,5
Incertitude	$\pm 1,9 \times 10^{-9}$	$\pm 0,125$	$\pm 0,5$	$\pm 0,125$

TABLE 3.3. Paramètres et incertitudes du modèle simplifié de [Engelund et Hansen \(1967\)](#).

mesure est fixée à 150m.

Lorsque les simplifications du modèle sont réalisées, les paramètres définis avec leurs incertitudes et le jeu d'observations avec incertitude disponible, on peut alors effectuer l'analyse *BaM!* qui permet de générer un échantillon de courbes de tarage vraisemblables. Elles sont représentées ici sur la figure 3.8. Comme dit précédemment, l'incertitude totale se décompose en deux incertitudes qui sont évaluées pour chaque courbe, l'incertitude paramétrique et l'incertitude structurelle. Les erreurs structurelles sont aléatoires et indépendantes d'un pas de temps à l'autre, elles disparaissent lors des calculs de moyenne ou de cumul de flux. Les erreurs paramétriques vont au contraire se propager aux moyennes et cumuls. La courbe de tarage la plus vraisemblable va être utilisée pour le calcul de bilan de flux de sable sur des périodes données en fonction des variables d'entrée Q et z_w . La représentation des résultats sous forme de courbes est complexe car des courbes sont calculées pour chaque valeur de z_w . Dans les figures 3.8, les jaugeages solides (points) sont classés par niveau z_w (autour d'un niveau moyen), les différentes couleurs représentent les classes de z_w .

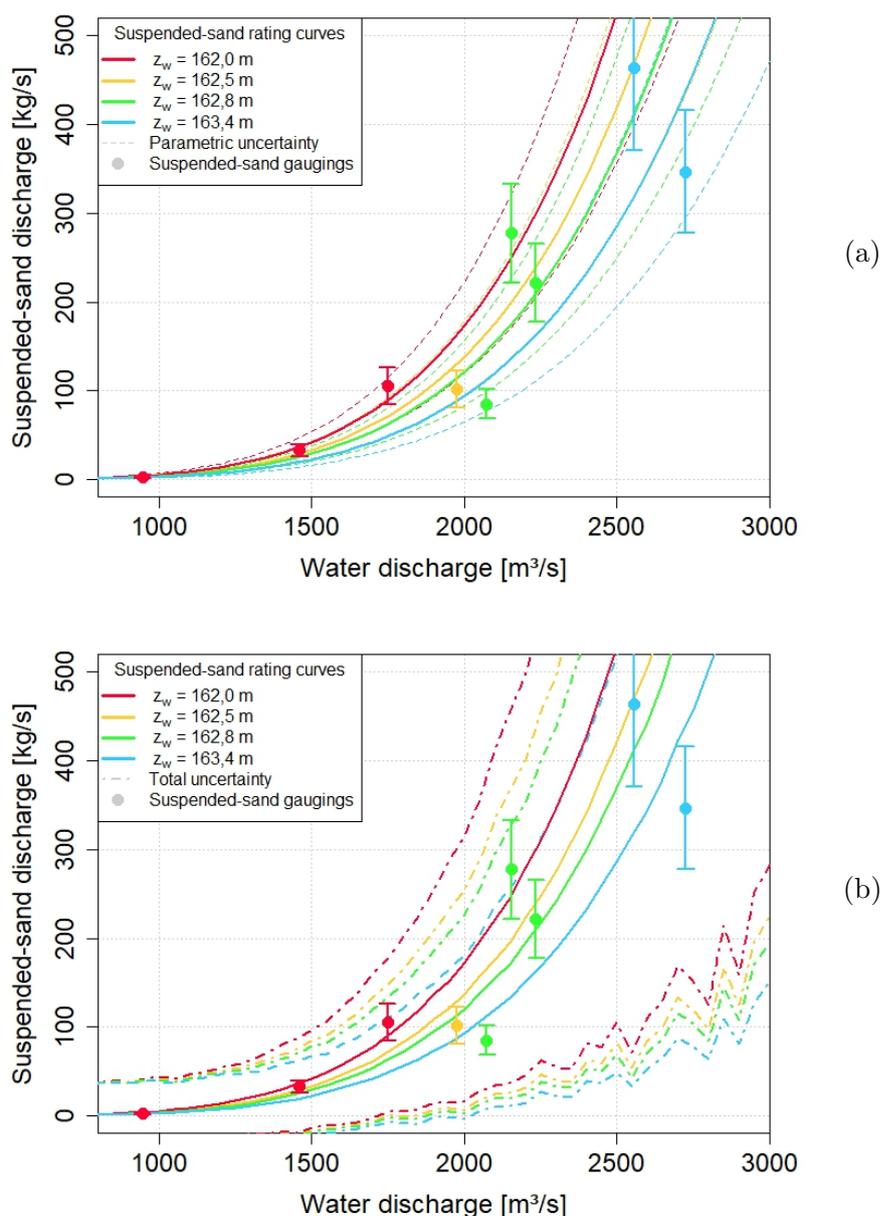


FIGURE 3.8. Courbes représentant le débit solide de sable en suspension sur le Rhône à Lyon Perrache avec la relation par capacité de Engelund et Hansen (1967). Les deux entrées du modèle sont le débit liquide et la hauteur d'eau. Seules les incertitudes paramétriques au niveau de probabilité de 95% sont affichées pour chaque cas. Les points sont les jaugeages solides mesurés entre décembre 2017 et mars 2020 avec une incertitude fixée à 20% (a). Même graphique mais avec les incertitudes totales au niveau de probabilité de 95% sont affichées pour chaque cas (b).

Sur la figure 3.8, seuls 4 valeurs de z_w sont représentées pour une question de lisibilité des graphiques. Ces deux graphiques font apparaître les incertitudes paramétriques et totales (cf. Figure 3.8) autour des 4 courbes. Sur la figure 3.7 (cas sans base physique), les incertitudes paramétriques et totales sont représentées. On remarque que les enveloppes d'incertitudes sont plus larges que dans le cas à base physique. En effet, une estimation plus juste des paramètres du modèle permet de meilleures performances de l'outil pour déterminer la courbe la plus vraisemblable avec

son incertitude associée. Par ailleurs, le calage sur les observations semble aussi un peu moins bon pour la méthode sans base physique qu'avec la méthode basée sur la loi par capacité de transport.

3.4 Bilan de flux sur le Rhône à Lyon Perrache

On peut ensuite propager les incertitudes sur des hydrogrammes à différents pas de temps. On combine donc les courbes de tarage avec une série temporelle de hauteur ou de débit liquide. Chaque réalisation de courbe de tarage sédimentaire est combinée avec la série temporelle pour obtenir une chronique de flux de sable ou arénogramme¹. La figure 3.9 représente le premier arénogramme avec incertitude paramétrique pour un évènement hydrologique sur le Rhône. L'intégration entre deux instants de ces arénogrammes va permettre de calculer un flux cumulé. Les flux cumulés sont calculés pour chacune des réalisations de courbe de tarage sédimentaire. On peut ensuite effectuer des statistiques sur ces résultats et notamment calculer le flux, qui est la médiane des valeurs obtenues et les quantiles à 2,5% et 97,5% qui sont les bornes de l'intervalle d'incertitude à 95%.

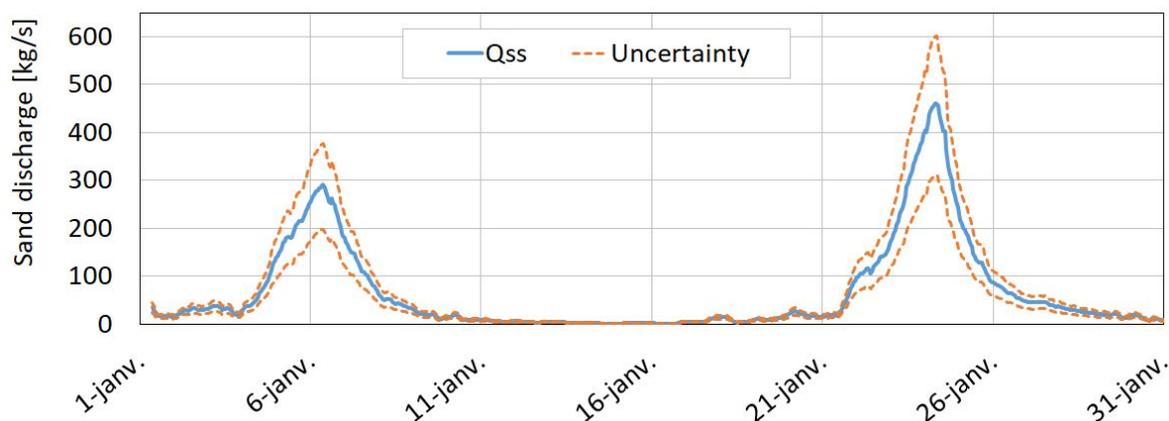


FIGURE 3.9. Arénogramme avec incertitudes calculés pour janvier 2018 avec la formule simplifiée de Englund et Hansen (1967) et l'outil *BaM!*. Le flux instantané est représenté par la ligne pleine et les incertitudes paramétriques au niveau de confiance à 95% par les lignes pointillées.

Seules les incertitudes paramétriques vont jouer sur les cumuls. En effet, les incertitudes structurelles vont disparaître tout au long du calcul car l'erreur structurelle est indépendante d'un pas de temps à l'autre. Elle va donc disparaître dans la sommation alors que les erreurs paramétriques vont se cumuler. On va ensuite calculer un bilan de flux de sable pour l'évènement de janvier 2018 (cf. Tableau 3.4 et Figure 3.9).

1. Néologisme proposé par J. Le Coz.

Période	Flux de MES fines [Mt]	Flux de sable par capacité (Engelund et Hansen, 1967) [Mt]	Flux de sable par loi empirique [Mt]
Janvier 2018	0,572	0,175 [0,120 ; 0,226]	0,172 [0,096 ; 0,258]

TABLE 3.4. Résultats provisoires de calcul de bilans de flux de sable en suspension pour janvier 2018 sur le Rhône à Perrache. Ces résultats sont basés sur l'étude décrite ci-dessus. La valeur médiane de flux est suivie des limites de l'intervalle d'incertitude à 95%.

Il serait aussi possible d'étendre les périodes de calcul sur plusieurs mois voire des années. Il est cependant trop tôt pour généraliser cette approche au-delà de la période d'observation car nous ne disposons que de peu de jaugeages solides dans des conditions hydrologiques particulières. Ces courbes de tarage sont à consolider par de nouveaux jaugeages solides qui permettront d'être plus représentatif, pour des périodes plus longues, sous réserve d'un apport de sable suffisant par l'amont.

Les flux de MES fines indiqués dans le tableau 3.4 sont calculés à partir des données de la station hydrosédimentaire OSR de Jons et disponibles sur la base de données BDOH. Les flux de sable et leur intervalle de confiance à 95% sont calculés à Perrache en suivant les méthodes avec et sans base physique. Les deux approches donnent des résultats assez proches, les incertitudes sont légèrement plus faibles dans le cas de la relation semi-empirique d'(Engelund et Hansen, 1967).

Le sable constituerait donc une proportion importante de l'apport sédimentaire du Rhône lors des crues de janvier 2018. Ces résultats sont à prendre avec précaution du fait de l'incertitude des lois permettant d'établir ces bilans. En effet, de nombreux auteurs s'accordent à dire que les incertitudes sont considérables avec ce genre de méthodes. Cependant, cette quantité de sable est cohérente avec les proportions de sable moyennes obtenues dans les échantillons prélevés lors de la crue de janvier 2018. Cet évènement de janvier 2018 garde sans doute un caractère exceptionnel du fait de la période de retour de cette crue. Lors de cet évènement, il semble que la majorité des apports amont provenaient de l'Ain et ont permis d'atteindre la capacité transport en suspension. Par ailleurs, cette capacité de transport n'est sans doute pas toujours atteinte, même à débit équivalent, en particulier si le flux provient majoritairement d'affluents avec un faible transport. Néanmoins, il est possible que la remobilisation des dépôts et des matériaux des berges soit active pour des débits soutenus, hors crue de l'Ain, ou qu'une rapide fonte des neiges amène suffisamment de sable pour atteindre la capacité.

On a vu que l'utilisation de courbes de tarage sédimentaires pour calculer des séries temporelles de flux de sable en suspension est possible pour des évènements particuliers. La grande difficulté des lois de transport par capacité est que les apports ne sont pas constants. On dit que le transport réel est «*supply limited*» a fortiori sur les cours d'eau aménagés dont l'équilibre sédimentaire est fortement perturbé. Si les apports amont sont suffisants, la capacité de transport peut être atteinte, comme dans le cas du Rhône durant l'hiver 2018. Dans ce cas là, le débit solide effectif était proche de la capacité «*capacity limited*» pour l'une des sections étudiées qui semble contrôler le transport sur ce tronçon. Dans le cas de la période de janvier 2018, mais aussi en mars 2020, des crues de l'Ain étaient concomitantes avec les crues du Rhône. L'Ain a probablement été le pourvoyeur principal de sable lors de ces évènements. Il sera intéressant à l'avenir de continuer à suivre les crues du Rhône à Perrache et de lancer des campagnes de prélèvements dans des contextes hydrologiques différents.

4 Conclusion

4.1 Conclusion générale

Sous l'impulsion de l'OSR et de ses partenaires, le Rhône et ses affluents ont fait l'objet de suivis ponctuels pour la mesure du sable ces dernières années lors d'évènements de crue ou de chasse. Ces évènements, s'ils n'ont pas tous pu être exploités pour calculer des flux de sable, ont permis de mieux comprendre le transport du sable en suspension. Ce sable en suspension graduée est présent dans le Rhône mais sa mobilisation est intermittente en fonction de la période de l'année, de sa disponibilité, des apports des affluents, des conditions hydrauliques et des contraintes liées aux aménagements et à la régulation des débits. Il se dépose dans les chenaux, devant les ouvrages ou les traverse, les contourne, rejoint le delta et alimente ainsi le littoral. L'étude globale Rhône ([Sogreah, 2000b](#)) indique que les sables morphologiquement actifs ($200 \mu\text{m}$) sur le littoral camarguais relèvent essentiellement du transport en suspension sur tout le cours du Rhône jusqu'à Arles. On retrouve un fond sableux seulement sur les derniers km du Rhône. Selon l'étude, le transit de ces sables ne serait pas perturbé par les ouvrages sur le Rhône, seule la mobilité des sables les plus gros ($0,5$ à 2 mm) serait affectée par les aménagements. Cette conclusion est contredite localement notamment à Lyon et Bourg les Valence où des dépôts réguliers de sable fin sont problématiques dans la gestion des ouvrages et du chenal. La distribution granulométrique des sables transportés en suspension est mal connue, car peu mesurée. D'après les études de [Lorgeré \(1959\)](#) menés en 1956-1957, cités dans l'Etude Globale Rhône ([Sogreah, 2000b](#)), la proportion était de 14% de sables (dont 2.5% de sables de diamètre supérieur à $125 \mu\text{m}$). Cette proportion avait permis l'estimation d'ordres de grandeur des flux annuels de sable qui pourraient être de quelques centaines de milliers de m^3/an . Cependant depuis les mesures de [Lorgeré \(1959\)](#), 11 aménagements hydro-électriques ont été mis en service sur le Rhône.

Les courbes de tarage sédimentaires sont un moyen intéressant pour calculer les flux de sable transportés lorsque la capacité de transport est atteinte. Des incertitudes sur ces relations peuvent être calculées par l'utilisation des statistiques bayésiennes. Cela permet d'évaluer les incertitudes sur les données issues des modèles de courbes de tarage sédimentaires, les séries temporelles de flux et les bilans.

Le jeu de données constitué à Lyon Perrache au cours de la thèse de [Dramais \(2020b\)](#) permet une première estimation des flux de sable à l'aide de différents modèles de courbes de tarage sédimentaires. Pour mieux évaluer les volumes de sable qui peuvent transiter lors des évènements importants, il est nécessaire de continuer cet effort de mesure pour évaluer la saisonnalité des apports. Mieux comprendre la temporalité du transport du sable peut aussi permettre de déceler d'éventuelles hystérésis ou d'affiner les bilans de flux et ainsi optimiser la gestion des ouvrages pour

éviter l'ensablement de zones particulières, ou simplement faciliter son transit vers l'aval.

Il serait intéressant de tester d'autres formules comme celles de [Van Rijn \(1984\)](#) ou [Camenen et Larson \(2008\)](#). On peut progresser sur l'évaluation des incertitudes en quantifiant les erreurs sur le calcul des jaugeages solides et propager également les incertitudes sur les entrées du modèle z_w et Q_w .

Cette approche pourrait également être validée sur d'autres sites et jeux de données avec mesures de débit solide régulières. La comparaison avec des résultats issus de stations hydrosédimentaires acoustiques pourrait aussi être envisagée. La question des apports amont variables est importante dans l'établissement des bilans. Des phénomènes d'hystérésis sont observés et doivent être pris en compte dans les estimations de flux.

4.2 Des courbes de tarage par capacité aux bilans de flux de sable sur le Rhône

Dans ce rapport, on a montré que l'utilisation de courbes de tarage sédimentaires basées sur la capacité de transport pour calculer des séries temporelles de flux de sable en suspension sur le Rhône à Lyon était possible pour des événements particuliers. Le calcul d'une courbe de tarage par capacité dans l'outil *BaM!* a également permis de quantifier le bilan de flux de sable (avec incertitudes associées) qui a transité sur le Rhône à Perrache durant l'hiver 2018. On estime ce flux à 0,175 Mt $\pm 30\%$ ($k=2$) ce qui correspond à un peu plus d'un tiers de la quantité de MES qui a transité pendant la même période (janvier 2018). Dans ce cas particulier, le débit solide effectif de sable en suspension était proche de la capacité pour l'une des sections étudiées. Il semblerait en effet que le flux solide en sable sur cette section soit contrôlé par la section de plus faible capacité de transport. Lors de cet événement, l'Ain a probablement été le pourvoyeur principal de sable en suspension, à moins qu'un ensemble de dépôts de sable autour de Miribel-Jonage ait été remis en suspension.

Dans cette approche par courbe de tarage sédimentaire par capacité, il serait intéressant de tester d'autres formules comme celles de [Van Rijn \(1984\)](#) ou [Camenen et Larson \(2008\)](#). On peut également progresser sur l'évaluation des incertitudes en évaluant plus finement les erreurs des jaugeages solides et en propageant les incertitudes sur l'évaluation des différentes mesures et paramètres utilisés dans les formules.

Le transport du sable sur le Rhône s'effectue majoritairement sur un lit de graviers et galets souvent pavé. Dans les tronçons étudiés, hors crue, il devient probablement rapidement inférieur à la capacité de transport (pour le sable) du fait des apports irréguliers et insuffisants. Si certains auteurs ([Sogreah, 2000b](#)) suspectent que le transport des sables se fait principalement par charriage avec une évacuation vers l'aval relativement lente selon les débits du Rhône, très peu de mesures sont disponibles pour le confirmer.

Les campagnes de jaugeages solides sur le Rhône à Lyon depuis l'hiver 2018 montrent des volumes de sable en suspension qui n'avaient jamais été quantifiés auparavant, seules les opérations de dragages nécessaires régulièrement et les dépôts en lit majeur étaient des indices de la présence de ce transport. Les expérimentations réalisées sur les sites du Haut-Rhône, de la confluence Isère

ou de Barcarin ont pu également montrer qu'un apport conséquent en sable pouvait avoir lieu lors des évènements de crue ou de chasse créant ponctuellement un transport de sable en suspension important. Ces apports qui créent des dépôts dans certaines zones peuvent avoir des conséquences graves sur la sûreté des ouvrages, la navigation, l'économie et l'environnement.

4.3 Perspectives sur la mesure de la charge sableuse sur le Rhône

Les efforts de mesure sur le Rhône vont continuer avec l'aide notamment d'une nouvelle barque de prélèvement à INRAE, équipé pour déployer des préleveurs isocinétiques (Dramais, 2020b). Ce moyen de déploiement offre de nouvelles possibilités de mesure et de collaboration avec nos partenaires de l'OSR pour déployer des instruments ou effectuer des campagnes de mesures lors d'évènements hydrologiques particuliers.

Le suivi pourrait s'accompagner de la mise en place de stations hydrosédimentaires multi-fréquences en continu (cf. Travail de thèse de Jessica Laible sur l'Isère commencé en novembre 2020) ou de travaux sur les méthodes de détermination de la concentration témoin pour réduire les temps de mesure et optimiser les protocoles, par le suivi d'une verticale ou d'un point unique dans la section.

L'hydrologie du sable sur le Rhône est encore à construire pour bien comprendre la dynamique et les flux. Une stratégie de jaugeages de sable régulière est indispensable pour permettre de mieux comprendre la dynamique du sable en suspension dans le Rhône et ses affluents.



Bibliographie

Bibliographie

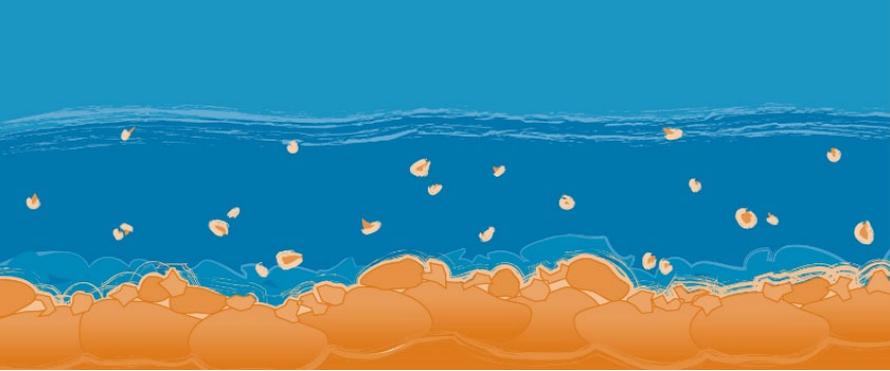
- AFNOR NF EN 872 (2005). Qualité de l'eau - Dosage des matières en suspension - Méthode par filtration sur filtre en fibres de verre. *Association Française de Normalisation, La Plaine Saint Denis, France*. 16p. [18](#), [27](#)
- ANDRÉ, R. (2018). Communication personnelle. *Lyon Métropole*. [33](#)
- ANTONELLI, C. (2002). *Flux sédimentaires et morphogénèse récente dans le chenal du Rhône aval*. Thèse de doctorat, Aix-Marseille 1. [1](#), [14](#)
- ANTONELLI, C., PROVANSAL, M. et VELLA, C. (2004). Recent morphological channel changes in a deltaic environment. the case of the Rhône River, France. *Geomorphology*, 57(3-4):385–402. [13](#)
- ARMIJOS, E., CRAVE, A., ESPINOZA, J. C., FILIZOLA, N., ESPINOZA-VILLAR, R., AYES, I., FONSECA, P., FRAIZY, P., GUTIERREZ, O., VAUCHEL, P. *et al.* (2020). Rainfall control on amazon sediment flux : synthesis from 20 years of monitoring. *Environmental Research Communications*, 2(5):051008. [49](#)
- ARNAUD-FASSETTA, G., QUISSERNE, D. et ANTONELLI, C. (2003). Downstream grain-size distribution of surficial bed material and its hydro-geomorphological significance in a large and regulated river : the Rhône River in its delta area (France)/Distribution granulométrique longitudinale des dépôts de fond superficiels et sa signification hydro-géomorphologique dans un grand fleuve chenalisé : le Rhône dans son aire deltaïque (France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 9(1):33–49. [37](#)
- ARTELIA (2012). Définition d'un programme de restauration hydraulique, hydromorphologique et écologique du Rhône à Miribel Jonage. *Gestion des crues et du transit sédimentaire*. [9](#), [10](#)
- ASSELMAN, N. (2000). Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*, 234(3-4):228–248. [45](#)
- ASTM D3977 (2007). Standard test method for determining sediment concentration in water samples. *ASTM International*, (D3977-97R07):6p. [18](#)
- BDOH (2019). Base de Données des Observatoires en Hydrologie, <https://bdoh.irstea.fr/>. [17](#)
- BERTHOIS, L. (1955). Apports sédimentaires en suspension dans la Loire pendant l'année 1954. *Comptes Rendu de l'Académie des Sciences*, 211:814–816. [46](#)
- BOUDET, L. (2017). *Modélisation du transport sédimentaire lié aux crues et aux tempêtes à l'embouchure du Rhône*. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille. [14](#)
- BRAVARD, J. (1987). *Le Rhône : Du Léman à Lyon*. La Manufacture. [4](#), [15](#)
- BRAVARD, J. P. et CLÉMENS, A. (2008). *Le Rhône en 100 questions*. ZABR, Zone Atelier Bassin du Rhône. [6](#)
- BURGEAP (2018). Renouvellement du plan de gestion sédimentaire du Vieux Rhône de Neyron. Rapport technique, Métropole de Lyon - Direction de l'eau. [9](#)
- CAMENEN, B., ARMIJOS, E., LE COZ, J., PETEUIL, C., FRETAUD, T., DRAMAIS, G., DUSSOUILLEZ, P., MOORE, S., FILIZOLA, N., CRAVE, A. *et al.* (2014a). A simple model to estimate sand transport in large rivers. *In World Large Rivers*, page 13. [49](#)
- CAMENEN, B., DRAMAIS, G., BUFFET, A., THOLLET, F., LE BESCOND, C., LAGOY, M., BERNI, C. et LE COZ, J. (2018). Estimation of sand suspension in a secondary channel of an alpine river.

- In E3S Web of Conferences*, volume 40, page 04014. EDP Sciences. [49](#)
- CAMENEN, B., DRAMAIS, G., LE COZ, J. et TOPPING, D. (2019a). Continuous sand-transport estimation on the Colorado River. *In RCEM 2019*. [49](#)
- CAMENEN, B. et LARSON, M. (2008). A general formula for noncohesive suspended sediment transport. *Journal of Coastal Research*, 24(3):615–627. [49](#), [51](#), [62](#)
- CAMENEN, B., LE COZ, J., DRAMAIS, G., PETEUIL, C., FRETAUD, T., FALGON, A., DUSSOUILLEZ, P. et MOORE, S. (2014b). A simple physically-based model for predicting sand transport dynamics in the Lower Mekong River. pages 2189–2197. [49](#)
- CAMENEN, B., NAUDET, G., DRAMAIS, G., LE COZ, J. et PAQUIER, A. (2019b). A multi-technique approach for evaluating sand dynamics in a complex engineered piedmont river system. *Science of The Total Environment*, 657:485–497. [13](#), [36](#), [49](#)
- CAMPBELL, F. B. et BAUDER, H. (1940). A rating-curve method for determining silt-discharge of streams. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 21(2):603–607. [44](#), [45](#)
- CNR (1989). Concession d'aménagement de mise en valeur et d'utilisation des berges du Rhône - Etude de l'ensablement des berges entre les pont De Lattre de Tassigny et de la Guillotière. Rapport technique, Compagnie Nationale du Rhône - Communauté Urbaine de Lyon. [10](#), [33](#), [45](#)
- CNR (1991). Traversée de Lyon - Désensablement des berges en rive gauche du Rhône. Rapport technique, Compagnie Nationale du Rhône - Communauté Urbaine de Lyon. [10](#), [33](#)
- COHN, T. A., DELONG, L. L., GILROY, E. J., HIRSCH, R. M. et WELLS, D. K. (1989). Estimating constituent loads. *Water resources research*, 25(5):937–942. [45](#)
- COLBY, B. (1964). *Discharge of sands and mean-velocity relationships in sand-bed streams*. US Government Printing Office. [44](#)
- DRAMAIS, G. (2020a). *Observation et modélisation des flux de sable dans les grands cours d'eau*. Thèse de doctorat, Université Lyon 1. [24](#), [43](#), [47](#), [48](#), [49](#)
- DRAMAIS, G. (2020b). Retour d'expérience sur le prélèvement et l'analyse des sédiments en suspension en rivière : enseignements d'un séjour au GCMRC (USGS). Rapport technique, INRAE. [61](#), [63](#)
- DRAMAIS, G., CAMENEN, B. et LE COZ, J. (2018a). Comparaison de méthodes pour la mesure des matières en suspension dans les cours d'eau, en présence de sable. *La Houille Blanche*, 2018(5-6):96–105. [2](#)
- DRAMAIS, G., CAMENEN, B., LE COZ, J., PIERREFEU, G., PETEUIL, C. et FRETAUD, T. (2018b). Observation and modeling of sand fluxes in the Rhône river during a flood. *In AGU Fall Meeting*, page 1. [49](#)
- DRAMAIS, G., HENRY, E., NAUDET, G., THOLLET, F., LAGOUY, M., BUFFET, A., HAUET, A., LEHMANN, E., KENNEL, R., LE COZ, J. et CAMENEN, B. (2018c). Quantification de la charge sableuse à chancy, bognes et champagneux durant l'APAVÉR. *Livrable OSR4*, (I.1):46. [18](#)
- DUGUÉ, V., WALTER, C., ANDRIES, E., LAUNAY, M., LE COZ, J., CAMENEN, B. et FAURE, J. (2015). Accounting for hydropower schemes operation rules in the 1d hydrodynamic modeling of the rhône river from lake geneva to the mediterranean sea. *In E-proceedings of the 36th IAHR World Congress*, volume 28. [32](#)
- ENGELUND, F. et HANSEN, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. *Technical University of Denmark Østervoldgade 10, Copenhagen K*. [49](#), [51](#), [56](#), [57](#), [58](#), [59](#), [60](#)
- FERGUSON, R. (1986). River loads underestimated by rating curves. *Water resources research*, 22(1):74–76. [45](#)
- GARZANTI, E., ANDÒ, S., VEZZOLI, G., MEGID, A. A. A. et EL KAMMAR, A. (2006). Petrology

- of Nile River sands (Ethiopia and Sudan) : sediment budgets and erosion patterns. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(3-4):327–341. [34](#)
- GARZANTI, E., VEZZOLI, G., ANDÒ, S., LAVÉ, J., ATTAL, M., FRANCE-LANORD, C. et DECELLES, P. (2007). Quantifying sand provenance and erosion (marsyandi river, nepal himalaya). *Earth and Planetary Science Letters*, 258(3-4):500–515. [34](#)
- GARZANTI, E., WANG, J.-G., VEZZOLI, G. et LIMONTA, M. (2016). Tracing provenance and sediment fluxes in the irrawaddy river basin (myanmar). *Chemical Geology*, 440:73–90. [34](#)
- GILLES, G., LAVAL, F., JOUANNEAU, C., CASSEL, M., DÉPRET, T. et PERRISSIN-FABERT, A. (2018). Diagnostic hydrosédimentaire du rhône dans l’agglomération de Lyon depuis la confluence avec l’Ain jusqu’au barrage de Pierre-Bénite. In *IS RIVERS*, page 5. IS Rivers 2018, Lyon. [10](#)
- GLYSSON, G. D. (1987). Sediment-transport curves. Rapport technique, US Geological Survey,. [45](#)
- GRAND LYON, M. (2017). Plan de gestion pluriannuel des opérations de dragage de la métropole de Lyon. Dragage de la concession du Rhône entre le pont de Lattre de Tassigny. et le pont Lafayette. Rapport technique, Métropole de Lyon. [10](#)
- GRASSO, D. A. et JAKOB, A. (2003). Charge de sédiments en suspension : comparaison entre deux méthodes de calcul. *GWA*, 83(12):898–905. [45](#), [46](#)
- GUERARD, A. et HARCOURT, L. (1885). Mouth of the River Rhone (includes plates). In *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, volume 82, pages 305–336. Thomas Telford-ICE Virtual Library. [16](#)
- GUERTAULT, L. (2015). *Évaluation des processus hydro-sédimentaires d’une retenue de forme allongée : application à la retenue de Génissiat sur le Haut-Rhône*. Thèse de doctorat, Université Lyon 1, École Doctorale Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA). [6](#)
- GUILLEMAIN, C. (1934). L’or du Rhône. *Géocarrefour*, (10-1-2):pp. 92–94. [16](#)
- HENRY, E. (2016). Mesures et modélisation des flux de sable dans les cours d’eau. application à une chasse de barrages. Mémoire de D.E.A., Ecole Nationale des Travaux Public de l’Etat. [18](#)
- HERSCHY, R. W. (2002). *Streamflow measurement*. CRC Press. [52](#)
- LAUNAY, M. (2014). *Flux de matières en suspension, de mercure et de PCB particulières dans le Rhône, du Léman à la Méditerranée*. Thèse de doctorat, Lyon 1. [45](#)
- LAUNAY, M., DUGUÉ, V., FAURE, J. B., COQUERY, M., CAMENEN, B. et LE COZ, J. (2019a). Numerical modelling of the suspended particulate matter dynamics in a regulated river network. *Science of The Total Environment*, 665:591–605. [4](#), [13](#), [34](#)
- LAUNAY, M., LE COZ, J., DIOUF, S., CAMENEN, B., THOLLET, F. et COQUERY, M. (2019b). Réévaluation des apports moyens de matières en suspension de l’arve au rhône. *La Houille Blanche*, (2):89–100. [45](#), [46](#)
- LE COZ, J., RENARD, B., BONNIFAIT, L., BRANGER, F. et LE BOURSICAUD, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves : A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509:573–587. [45](#), [52](#)
- LOIZEAU, J. L. et WILDI, W. (2007). Aspects sédimentaires de la gestion du barrage de verbois. *Rapport, Services Industriels de Genève et Service de l’écologie de l’eau de l’état de Genève*. 40p. [4](#)
- LORGERÉ, H. (1957). Turbidité des eaux du Rhône. Rapport préliminaire. Rapport technique Rapport R4673, Sogreah et Génie Rural du Gard. [38](#)
- LORGERÉ, H. (1959). Turbidité des eaux du rhône. Rapport technique R7193, Sogreah. [38](#), [61](#)
- MANSANAREZ, V., RENARD, B., LE COZ, J., LANG, M. et DARIENZO, M. (2019). Shift happens! adjusting stage-discharge rating curves to morphological changes at known times. *Water Resources*

- Research*, 55(4):2876–2899. [52](#)
- MOATAR, F., MEYBECK, M., RAYMOND, S., BIRGAND, F. et CURIE, F. (2013). River flux uncertainties predicted by hydrological variability and riverine material behaviour. *Hydrological processes*, 27(25):3535–3546. [45](#)
- NAUDET, G., DUGUÉ, V., CAMENEN, B., LE COZ, J., DRAMAIS, G. et PAQUIER, A. (2016). Étude de la dynamique hydrosédimentaire au niveau de la confluence entre l'isère et le rhône. *Rapport technique*. [13](#), [35](#)
- OFEV (2019). Annuaire hydrologique de la Suisse 2018. *Office fédéral de l'environnement*. [17](#)
- OLLIVIER, P., HAMELIN, B. et RADAKOVITCH, O. (2010). Seasonal variations of physical and chemical erosion : A three-year survey of the rhone river (france). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(3):907–927. [45](#)
- OSR 4 (2018). Action iii.3 : Bilan actualisé des flux de matières en suspension et micropolluants associés sur le bassin du rhône. *GRAIE*. [12](#)
- PARDÉ, M. (1925). *Le Calcul des débits du Rhône et de ses affluents*. Allier père et fils. [1](#)
- PARROT, E. (2015). *Analyse spatio-temporelle de la morphologie du chenal du Rhône du Léman à la Méditerranée*. Thèse de doctorat, Lyon 3. [16](#)
- PONT, D., SIMONNET, J. et WALTER, A. (2002). Medium-term changes in suspended sediment delivery to the ocean : Consequences of catchment heterogeneity and river management (Rhône River, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54(1):1–18. [1](#), [14](#), [45](#)
- POULIER, G., LAUNAY, M., LE BESCOND, C., THOLLET, F., COQUERY, M. et LE COZ, J. (2019). Combining flux monitoring and data reconstruction to establish annual budgets of suspended particulate matter, mercury and pcb in the rhône river from lake geneva to the mediterranean sea. *Science of the Total Environment*, 658:457–473. [1](#), [45](#), [46](#)
- RACCASI, G. (2008). *Mutations géomorphologiques récentes du Rhône aval, Recherches en vue de la restauration hydraulique et de la gestion des crues*. Thèse de doctorat, Université de Provence. [14](#)
- RENARD, B., LE COZ, J., BLANQUART, B. et BONNIFAIT, L. (2015). Statistiques avancées pour le calcul d'incertitudes en Hydrologie. Applications à la prédétermination et à l'hydrométrie. [52](#)
- RENNIE, C., RAINVILLE, F. et KASHYAP, S. (2007). Improved estimation of ADCP apparent bed-load velocity using a real-time Kalman filter. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(12):1337–1344. [30](#)
- ROIGNOT, R. (1970). Étude des ressources en sables et graviers dans les périmètres des zones d'aménagement de la région Lyonnaise. *Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, page 35 p. [15](#)
- ROLLET, A. J. (2007). *Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain*. Theses, Université Jean Moulin - Lyon III. [9](#)
- SABATIER, F., MAILLET, G., PROVANSAL, M., FLEURY, T.-J., SUANEZ, S. et VELLA, C. (2006). Sediment budget of the Rhône delta shoreface since the middle of the 19th century. *Marine Geology*, 234(1-4):143–157. [14](#)
- SADAOUI, M., LUDWIG, W., BOURRIN, F. et RAIMBAULT, P. (2016). Controls, budgets and variability of riverine sediment fluxes to the gulf of lions (nw mediterranean sea). *Journal of Hydrology*, 540:1002–1015. [1](#), [45](#)
- SERRAT, P., LUDWIG, W., NAVARRO, B. et BLAZI, J. (2001). Variabilité spatio-temporelle des flux de matières en suspension d'un fleuve côtier méditerranéen : la têt (france). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 333(7):389–397. [45](#)

- SOGREAH, c. (2000a). Etude globale pour une stratégie de réduction des risques liés aux crues du Rhône - étude du transport solide - 1ère étape - diagnostic de l'état actuel - analyse des affluents. Rapport technique, Institut interdépartementale des bassins Rhône-Saône. [9](#), [12](#), [37](#)
- SOGREAH, d. (2000b). Etude globale pour une stratégie de réduction des risques liés aux crues du Rhône - étude du transport solide - 2ème étape - bilan et perspectives. Rapport technique, Institut interdépartementale des bassins Rhône-Saône. [2](#), [38](#), [61](#), [62](#)
- SURELL, A. (1847). *Mémoire sur l'amélioration des embouchures du Rhône*. Imprimerie Ballivet et Fabre. [1](#)
- THOLLET, F., LE BESCOND, C., LAGOUY, M., A., G., GRISOT, G., LE COZ, J., COQUERY, M., LEPAGE, H., GAIROARD, S., GATTACCECA, J., AMBROSI, J.-P. et RADAKOVITCH, O. (2018). Observatoire des sédiments du rhône sur bdoh. <https://dx.doi.org/10.17180/OBS.OSR>. [32](#)
- THOMAS, R. B. (1985). Estimating total suspended sediment yield with probability sampling. *Water Resources Research*, 21(9):1381–1388. [45](#)
- UNEP/MAP/MED (2003). Riverine transport of water, sediments and pollutants to the Mediterranean sea. Rapport technique MAP Technical Reports Series No. 141, UNEP/MAP/MED, Athens. [1](#)
- VAN RIJN, L. C. (1984). Sediment transport, part II : suspended load transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110(11):1613–1641. [62](#)
- VELLA, C., FLEURY, T.-J., RACCASI, G., PROVANSAL, M., SABATIER, F. et BOURCIER, M. (2005). Evolution of the rhône delta plain in the holocene. *Marine geology*, 222:235–265. [14](#)
- WALLING, D. (1977). Limitations of the rating curve technique for estimating suspended sediment loads, with particular reference to British rivers. [45](#), [46](#)
- WALLING, D. (1988). The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield : some further comments. *In Symposium on Sediment Budgets, Porto Alegre, Brazil, 1988*. [45](#)
- ZEBRACKI, M., EYROLLE-BOYER, F., EVRARD, O., CLAVAL, D., MOURIER, B., GAIROARD, S., CAGNAT, X. et ANTONELLI, C. (2015). Tracing the origin of suspended sediment in a large mediterranean river by combining continuous river monitoring and measurement of artificial and natural radionuclides. *Science of the Total Environment*, 502:122–132. [1](#)



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

CAR

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 GÉOSCIENCES 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
ATER 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