



HAL
open science

Évaluation des stocks de sable dans le Rhône en amont de Lyon

Florianne Masquelier

► **To cite this version:**

Florianne Masquelier. Évaluation des stocks de sable dans le Rhône en amont de Lyon. Sciences de l'environnement. 2022. hal-04081317

HAL Id: hal-04081317

<https://hal.inrae.fr/hal-04081317>

Submitted on 25 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE – UFR Sciences Exactes et Naturelles

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

MASTER 3G

(Géoressources, Géorisques, Géotechnique)

PARCOURS : GEORIS (Géosciences et Risques)

Évaluation des stocks de sable dans le Rhône en amont de Lyon

Floriane MASQUELIER

Sous la direction de : **M. Jean-Paul DEROIN, Professeur des Universités à l'URCA – Reims.**

Responsables du stage : **M. Benoît CAMENEN, Directeur de recherche, et**

M. Adrien BONNEFOY, Technicien de recherche,

à INRAE – Centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes.

Soutenu le 15 septembre 2022.



Résumé

Les cours d'eau sont des systèmes complexes qu'il convient de comprendre afin d'améliorer leur gestion. Dans le cadre du programme de recherche OSR6 – Observatoire des Sédiments du Rhône, 6^{ème} volet – une « Evaluation des stocks de sable dans le Rhône en amont de Lyon » a été menée lors d'un stage de recherche. Il a été réalisé par Floriane MASQUELIER sur une durée de 6 mois et encadré par Benoît Camenen et Adrien Bonnefoy (INRAE). Il s'inscrit dans le cadre de l'obtention du Master 3G (Géoressources, Géorisques et Géotechnique), parcours GEORIS, de l'Université Reims Champagne-Ardenne. Les missions confiées ont été de réaliser des campagnes de mesures sur le terrain afin d'acquérir des données sur les stocks de sables et de fines (argiles et limons) pouvant être mobilisés lors de crues sur la base d'un protocole développé en interne. L'évaluation des stocks totaux de ces classes granulométriques est ensuite permise par la spatialisation des données. 12 campagnes de terrain ont été réalisées entre la confluence Ain-Rhône et le seuil de Villeurbanne en amont de Lyon, pour un total de 120 échantillons prélevés selon deux méthodes, hors eau et en eau. Leur analyse sur le terrain ainsi qu'en laboratoire a permis de caractériser leur granulométrie qui a été comparée afin de vérifier l'homogénéité de zones délimitées sur le terrain par géo-positionnement. Des stocks locaux moyens variant entre 0.09 et 16 kg.m⁻² sont estimés en surface dans le secteur d'étude ; entre 0.2 et 300 kg.m⁻³ en sub-surface. Enfin, l'utilisation du modèle hydraulique 1D du Rhône (développé dans le cadre du programme OSR) a permis d'estimer l'épaisseur du substrat remobilisé lors d'un événement hydrologique tel que la crue du 24 janvier 2018. Il a ainsi été évalué que cet événement a potentiellement mobilisé environ 1 900 tonnes de sables dans le secteur étudié. Les sables mobilisés sont principalement des sables fins, provenant de la couche de surface, et de la confluence entre l'Ain et le Rhône. Ce résultat reste très inférieur au flux total mesuré lors de cet événement et les limites de la méthodologie utilisée sont ainsi discutées. L'ensemble des résultats obtenus présente un intérêt certain dans l'optique d'améliorer la compréhension de la dynamique sédimentaire du Rhône dans sa partie localisée entre la confluence Ain-Rhône et le seuil de Villeurbanne, en amont de Lyon.

Mots-clés : OSR ; sédiments ; échantillonnage ; modèle hydro-sédimentaire 1D.

Abstract

Rivers are complex systems that need to be understood to improve their management. As part of the research program OSR6 - Observatoire des Sédiments du Rhône, 6th part - an assessment of sand stocks in the River Rhône is carried out during a reasearch internship. This 6-month internship is accomplished by Floriane MASQUELIER and supervised by Benoît Camenen and Adrien Bonnefoy (INRAE). It is part of the Master 3G ("Géoressources, Géorisques et Géotechnique"), GEORIS, of the Université Reims Champagne-Ardenne. Main missions entrusted were to carry out field measurement campaigns to acquire data on sand and fine (silt and clay) sediments stocks. The evaluation of the total sand stock is then allowed by the spatialisation of the data. 12 field campaigns were carried out from the confluence between the Ain River and the Rhône River to Villeurbanne's weir, for a total of 120 samples collected according to two methods, out of water and in water. Their analysis in the field and in the laboratory allowed to characterize their grain size distribution which was compared to verify the homogeneity of the zones delimited in the field by geo positioning. Mean local storage varying from 0.09 to 16 kg.m⁻² were estimated at the surface of studied banks. The values vary from 0.2 and 300 kg.m⁻³ at the sub-surface. The 1D hydraulic model of the River Rhône (developed in the frame of the OSR program) was used to evaluate the thickness of the bedload layer during a hydrological flood such as the one in January 2018. Eventually, it allows us to estimate that 1 900 tonnes of sand can be mobilized in the studied area by such an event. Mobilized sands are mainly fine sands, coming from the surface layer and from the confluence between the Ain River and the Rhône River. This result remains quite low compared to the measured total flux of sand during this event. Some limits of the methodology are discussed to explain the observed differences. All the results obtained are of interest to improve the understanding of the sedimentary dynamics of the Rhône River in its part located between its confluence with Ain River and Villeurbanne's weir, upstream of Lyon.

Key words: OSR ; sediments ; sampling ; 1-D hydro-sedimentary model.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidée dans la rédaction de ce mémoire.

Tout particulièrement, merci à mes encadrants, Benoît Camenen – directeur de recherche à INRAE – et Adrien Bonnefoy – technicien de recherche à INRAE. Vous m'avez laissé une grande part d'autonomie durant ces six mois de stage qui m'a permis de m'investir d'autant plus dans le projet de recherche. Vous avez également su m'encadrer, me diriger pour aller plus loin, notamment par vos retours précieux sur mes bribes de rapport, rédigées au fur et à mesure ; puis finalement sur mon mémoire complet.

Je remercie également les enseignants du master 3G - parcours GEORIS - de l'Université Reims Champagne-Ardenne pour votre implication durant ces deux années de formation dont l'une qui n'a pas été facile à gérer avec la distance.

Je suis extrêmement reconnaissante envers toutes les personnes qui nous ont accompagnés sur le terrain et sans qui nous n'aurions pas pu collecter un si grand nombre de données. Merci à vous, Bérangère, Felipe, Fabien, Fanny, Guillaume, Junjian, Katarina, Léa, Leslie, Purnima, Robin, Thibault, Tulio. C'était une bonne occasion d'apprendre à vous connaître, au détour d'un lavage de sédiments ! Merci également à Alexandre Peeters et Delphine Sirven de l'UMR5600 de nous avoir présenté la manip' McNeil. Les discussions qui ont suivi ont été particulièrement enrichissantes.

Un remerciement bis à Fanny pour les filtrations et photos de terrain qui ont pris place dans le rapport, à Guillaume pour les photos également, à Felipe pour le gain de temps que ta routine R a permis, à Junjian pour nos discussions sur les stocks de sables et les formules de transport solide, à Léa pour avoir fait tourner le modèle et avoir pris le temps de m'expliquer le fonctionnement de PamHyr.

Merci à tous les collègues et aux stagiaires pour la bonne humeur qui se dégage des bureaux et pour les bons moments partagés autour d'un repas, d'un thé, d'un gâteau, d'un baby-foot ou d'un cactus...

Je salue la mise en place des Discussions HyPoPo qui sont à la fois un moyen de découvrir le travail des équipes qui y participent, mais aussi de présenter le sien et de pouvoir avoir des questions, avis...

Et pour finir, je remercie mes proches pour leur soutien quotidien durant les six mois (et bien plus !).

Table des matières

Introduction.....	1
I. Synthèse bibliographique.....	3
I.1. Dynamique fluviale et ses enjeux.....	3
I.1.1. Transport solide et équilibre des cours d'eau.....	3
I.1.2. Enjeux liés au transport solide.....	5
I.1.3. Origine et devenir de la charge sédimentaire – cas particulier des sables.....	7
I.2. Stocks sédimentaires.....	8
I.2.1. Variabilité verticale du lit fixe : les types de stocks.....	9
I.2.2. Quantification et évaluation des stocks de sédiments.....	9
I.2.3. Remobilisation des sédiments.....	12
I.3. Modélisation hydro-sédimentaire.....	14
II. Matériel et méthodes pour l'estimation de stocks de sables.....	15
II.1. Présentation du secteur d'étude.....	15
II.2. Protocoles de mesures.....	19
II.2.1. Echantillonnage des bancs immergés.....	19
II.2.2. Echantillonnage des bancs émergés.....	20
II.2.3. Acquisitions GPS et zonation des bancs.....	21
II.3. Méthodes d'analyse des échantillons.....	22
II.3.1. Analyse sur le terrain.....	22
II.3.2. Analyse en laboratoire.....	23
II.3.3. Estimation des stocks locaux.....	24
II.3.4. Représentation des données.....	25
II.4. Modélisation hydro-sédimentaire 1-D et analyse spatiale.....	25
II.4.1. Modélisation hydro-sédimentaire 1-D du Rhône en amont de Lyon.....	25
II.4.2. Traitement SIG.....	26

II.4.3. Interpolation et extrapolation des données granulométriques.....	27
II.4.4. Calcul de stocks totaux.....	28
III. Evaluation des stocks de sables dans le Rhône en amont de Lyon.....	29
III.1. Etude préliminaire.....	29
III.1.1. Etat des prospections.....	29
III.1.2. Estimation de l'erreur sur le tamisage.....	30
III.1.3. Comparaison des méthodes de prélèvements.....	33
III.2. Granulométrie des bancs de la zone d'étude.....	36
III.2.1. Analyse granulométrique générale.....	36
III.2.2. Analyse des classes granulométriques inférieures à 2mm.....	41
III.2.3. Analyse de la granulométrie de surface : comparaison de deux méthodes.....	44
III.3. Stocks de sables.....	45
III.3.1. Stocks locaux.....	45
III.3.2. Calcul des paramètres de mobilisation du lit.....	47
III.3.3. Stocks totaux.....	48
IV. Discussion.....	50
IV.1. Exploitation des résultats.....	50
IV.2. Discussion des hypothèses.....	50
IV.3. Discussion des méthodes.....	52
IV.4. Propositions de poursuite.....	53
Conclusions et perspectives.....	54
Références.....	56
Bibliographie.....	56
Sitographie.....	62
Annexes.....	63

Table des illustrations

Figures

Figure 1 : Diagramme de Hjulström (1935) présentant les phases du transport solide.	3
Figure 2 : Schématisation simplifiée de l'effet d'un déséquilibre hydro-sédimentaire sur la morphologie d'un cours d'eau.....	4
Figure 3 : schématisation des modes de transport des sédiments dans une rivière. Source : UNIT (web TV), 2014	8
Figure 4: Types de stocks de sables dans les rivières à graviers. a) armurage en surface. b) matrice sableuse, avec possibilité de colmatage en surface et pas en sub-surface. c) dépôt de sable en surface. D'après Bunte and Abt, 2001b.....	9
Figure 5: Localisation de la zone d'étude. a) Carte de France localisant Lyon en région Auvergne Rhône-Alpes, dans le département du Rhône. b) Image Sentinel 2 prise le 8 mars 2022 et annotée. Source: Copernicus.....	15
Figure 6: Cartes géologiques localisant le Rhône Amont (vallée du Rhône en amont de Lyon). a) Extrait de la carte géologique de France à 1/1 000 000. b) Carte géologique harmonisée à 1/50 000 du Rhône Amont (zone d'étude).....	16
Figure 7: Carte d'occupation du sol et de conservation des espaces naturels dans le Rhône Amont (vallée du Rhône en amont de Lyon).....	18
Figure 8: Synthèse hydrologique à Lyon-Perrache. Données de la CNR, disponibles sur hydro.eaufrance.fr	18
Figure 9: Utilisation en eau et présentation du cylindre de prélèvement (McNeil & Ahnell, 1964).....	19
Figure 10: Prélèvement d'échantillons de surface et sub-surface selon la méthode « des placettes » (Deng <i>et al.</i> , 2022).	20
Figure 11 : Acquisition de données GPS à l'aide d'un capteur GPS GX1230 – Leica Geosystems, 2004.....	21
Figure 12 : Gabarit pour la mesure de la granulométrie de surface selon la méthode de Wolman [1954].	22
Figure 13 : Dispositifs pour l'analyse de la granulométrie des échantillons : tamisage à 10mm, 2mm, 500µm et 10µm ; pesée des particules de diamètre supérieur à 2mm.	23
Figure 14 : Outils pour l'analyse en laboratoire. a) étuve pour le séchage des sédiments ; b) dispositif de filtration des matières en suspension ; c) balance de précision pour la pesée des dépôts solides issus de la filtration.	24
Figure 15 : Interface utilisateur PAMHYR affichant le réseau hydraulique du Rhône en amont de Lyon pour lequel ont été exécutés les codes de calcul.	26
Figure 16: Traitement des données GPS sur le logiciel ArcGIS. a) Les polygones correspondent aux zones homogènes du banc Mi09 délimité le 22 avril 2022. Fond de carte : BD Ortho – IGN – juin 2020 ; b) interface d'ArcMap présentant les résultats de calcul de géométrie pour les trois polygones.....	27
Figure 17 : Comparaison des surfaces de bancs obtenues selon deux méthodes : délimitation sur le terrain à l'aide d'un capteur GPS et délimitation à partir d'une image satellite à résolution 10 m.	30

Figure 18 : Variabilité des erreurs relatives sur le tamisage de terrain selon deux méthodes : (a) tamisage à sec, (b) tamisage par lavage. L'effectif dans chaque boîte est de 11.....	32
Figure 19: Variabilité de l'erreur relative sur les caractéristiques granulométriques des échantillons prélevés. d_{50} est le diamètre médian, d_{16} et d_{84} sont respectivement les diamètres atteints par 16 et 84 % de l'échantillon. L'effectif dans chaque boîte est de 120.	33
Figure 20: Courbes granulométriques cumulatives de plusieurs échantillons prélevés selon les méthodes des « placettes » et « McNeil » à proximité les uns des autres, sur le banc VR01 du Vieux Rhône. Les échantillons sont nommés <i>Nom du banc – Méthode Numéro de l'échantillon</i> . L'abréviation M correspond à la méthode « McNeil » appliquée dans l'eau et MT hors de l'eau (« terrestre »). P correspond à la méthode de Deng (« placette »).....	34
Figure 21: Courbes granulométriques cumulatives de plusieurs échantillons prélevés selon les méthodes des « placettes » et « McNeil » à proximité les uns des autres, sur le banc Mi03 du canal de Miribel. Les échantillons sont nommés <i>Nom du banc – méthode et numéro de l'échantillon</i> . L'abréviation M correspond à la méthode « McNeil » appliquée dans l'eau et MT hors de l'eau (« terrestre »). P correspond à la méthode de Deng (« placette »).....	35
Figure 22 : Courbes granulométriques cumulatives de plusieurs échantillons prélevés selon les méthodes des « placettes » et « McNeil » à proximité les uns des autres, sur le banc Mi11 du canal de Miribel. Les échantillons sont nommés <i>Nom du banc – méthode et numéro de l'échantillon</i> . L'abréviation M correspond à la méthode « McNeil » appliquée dans l'eau et P correspond à la méthode de Deng (« placette »).....	36
Figure 23 : Courbes granulométriques cumulatives des échantillons prélevés dans quatre secteurs : Vieux-Rhône, Canal de Miribel, Seuil de Villeurbanne, Confluence Ain-Rhône. Les échantillons sont séparés selon le secteur ainsi que selon le type, à savoir, échantillon de surface ou de sub-surface prélevé selon la méthode des placettes (Deng et al., 2022), ou échantillon total prélevé selon la méthode « McNeil » (McNeil and Ahnell, 1964).	40
Figure 24: Répartition des pourcentages des classes granulométriques inférieures à 2mm pour les échantillons prélevés dans quatre secteurs : Vieux-Rhône, Canal de Miribel, Seuil de Villeurbanne, Confluence Ain-Rhône. Les échantillons sont séparés selon le secteur ainsi que selon le type, à savoir, échantillon de surface ou de sub-surface prélevé selon la méthode des « placettes », échantillon total prélevé selon la méthode « McNeil », ou dépôt prélevé en surface.	43
Figure 25 : Comparaison entre deux méthodes de détermination de la granulométrie de surface pour le d_{90} et le d_{50} : méthode de "Wolman" (Wolman, 1954) et méthode des "placettes" (Deng et al., 2022).	44
Figure 26 : Stocks ponctuels de sables en surface, sub-surface et dans le chenal en eau (« McNeil »). Les abréviations A, Mi-SV et VR correspondent respectivement aux trois grands secteurs d'études : « Ain », « Canal de Miribel et seuil de Villeurbanne » et « Vieux Rhône ».....	46
Figure 27 : Comparaison des stocks en surface et sub-surface, en supposant une épaisseur de surface de 80 mm.	46
Figure 28 : Comparaison des stocks en surface et en eau, en supposant une épaisseur de surface de 80 mm... ..	47
Figure 29 : Evolution de l'Ain, à sa confluence avec le Rhône, entre 2008 et 2021. Source des photographies : IGN	51
Figure 30 : Carte d'une partie du bief "Ain amont" intégré au modèle hydro-sédimentaire 1-D du Rhône. Fond: image Sentinel 2 du 14 avril 2022.	53

Tableaux

Tableau 1 : Liste non exhaustive d'impacts engendrés par l'érosion ou le dépôt de sédiments dans un cours d'eau (Camenen & Melun, 2021; Landon, 1999) 6

Tableau 2 : Synthèse des informations relatives à chaque zone homogène. Les noms de zones apparaissant en caractères gras correspondent aux zones des bancs prospectés. 48

Abréviations

1-D : unidimensionnel

CNR : Compagnie nationale du Rhône

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

DCE : Directive-cadre sur l'eau

EDF : Electricité de France

ESA : Agence spatiale européenne (de anglais *European Space Agency*)

GPS : système de géo positionnement (de anglais *Global positioning system*)

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

LEMA : Loi sur les milieux aquatiques

MES : matières en suspension

PAG : Petit âge glaciaire

PK : point kilométrique

RTK : cinématique temps réel (de anglais *Real time kinematic*)

SIG : Système d'information géographique

ZABR : Zone atelier bassin du Rhône

Notations

$\delta_{b,i}$: épaisseur d'érosion moyenne dans la zone homogène n°i

θ : paramètre de Shields

ρ : masse volumique de l'eau ($\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$)

ρ_s : masse volumique du sédiment ($\rho_s = 2650 \text{ kg.m}^{-3}$ pour de la silice)

τ_f : contrainte de cisaillement de fond

A : aire échantillonnée

A_i : aire de la zone homogène n°i

d : diamètre d'une particule

d_i : diamètre correspondant à i % de passant (en masse)

d_{50} : diamètre médian (50 % de passant)

g : accélération de la pesanteur ($g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$)

H : hauteur creusée pour le prélèvement

H_1 : épaisseur de la couche de surface

H_2 : épaisseur de la couche de sub-surface

K_s : coefficient de Strickler global

K_{sg} : coefficient de Strickler de peau

$M_{[0.1-2]mm}$: masse des sédiments de la fraction [0.1-2] mm

$M_{éch.}$: masse de MES dans l'échantillon total

$M_{sédiments}$: masse des sédiments prélevés

$m_{sous-éch.}$: masse de MES dans le sous-échantillon liquide

n_{ZH} : nombre de zones homogènes,

R_h : rayon hydraulique

S_t ou S_{tb} : stock volumique (en kg. m^{-3})

$S_{t, surface}$ ou S_{ts} : stock surfacique (en kg. m^{-2})

$\overline{S_{t,i}}$: stock moyen pour la zone homogène n°i,

U : vitesse du courant dans la direction de l'écoulement

$V_{sous-éch.}$: volume du sous-échantillon liquide filtré

$V_{tamisage}$: volume d'eau utilisé sur le terrain pour le tamisage de l'échantillon.

Introduction

Les cours d'eau sont des systèmes complexes tendant vers un équilibre entre le débit de l'eau en écoulement et les sédiments transportés (Lane, 1955). La dynamique fluviale est contrainte par la géologie et le climat, dont l'évolution entraîne constamment des ajustements de la géométrie des lits, de la granulométrie transportée, et/ou de la vitesse du courant. Les aménagements tels que les barrages et les digues constituent une perturbation de l'hydrosystème, induisant de nouveaux réajustements hydrodynamiques.

Alors qu'à l'origine le Rhône est une rivière à graviers et galets, d'importantes quantités de sables ont été mesurées en suspension à Lyon-Perrache lors des crues de janvier 2018 (Dramais, 2020). Ce transport traduit probablement l'un des réajustements du Rhône, avec notamment une diminution de la capacité de transport d'éléments grossiers par une réduction du débit liquide. Pour suivre ces potentiels perturbations et réajustements du Rhône, un suivi est réalisé au travers de nombreux projets de recherche, notamment intégrés à un programme : l'OSR.

L'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) est un programme de recherche ayant pour objectif la compréhension des dynamiques hydro-sédimentaires du Rhône afin d'adapter les projets d'aménagement et de limiter les risques encourus par les personnes, l'environnement et les biens. Il permet une collaboration entre des groupes de recherche (*e.g.* CNRS – Centre national de la recherche scientifique, INRAE - Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) et les gestionnaires territoriaux (*e.g.* CNR – Compagnie nationale du Rhône, EDF – Electricité de France). Dans ce cadre, un stage d'une durée de 6 mois a été proposé par INRAE, dont ce rapport présente les objectifs, les travaux et les principaux résultats.

INRAE, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, est un établissement public scientifique et technologique (EPST) créé en 2020 par l'union de l'INRA, Institut national de la recherche agronomique, et d'IRSTEA, Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture. Le centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes compte parmi les 18 centres régionaux d'INRAE et regroupe 21 unités de recherches dont l'unité RiverLy basée à Villeurbanne (69). Les problématiques de recherche de RiverLy sont axées sur la compréhension des hydrosystèmes, avec des équipes spécialisées en écologie (EcoFlows), microbiologie (EMA), écotoxicologie (EcoTox), chimie environnementale (LAMA, PollDiff), hydrologie (HYBV) et hydraulique (HyR). Benoit Camenen, directeur de recherche et responsable de l'équipe Hydraulique des Rivières (HyR), et Adrien Bonnefoy, technicien de recherche au pôle métrologie de l'équipe HyR, encadrent le stage visant à évaluer les stocks de sables dans un secteur restreint du

Rhône. La connaissance de ces stocks est un moyen de prévenir leur mise en suspension lors de crues, et de modéliser la dynamique hydro-sédimentaire du Rhône. Cet aspect constitue un second objectif du stage. Enfin, dans la continuité de la thèse réalisée par G. Dramais (Dramais, 2020), la question de l'origine des sables repris lors des événements hydrologiques fait partie intégrante de la problématique de recherche.

Les missions confiées ont été de réaliser des campagnes de mesures sur le terrain afin d'acquérir des données sur les stocks de sables et de fines pouvant être mobilisés facilement lors de crues. La spatialisation de ces données doit permettre une évaluation des stocks totaux de ces classes granulométriques. Par la suite, ces données seront utilisées pour reproduire la remobilisation des sables à l'aide du modèle hydro-sédimentaire 1-D du Rhône, également développé dans le cadre de l'OSR.

I. Synthèse bibliographique

La connaissance du stockage des sables et de leur mobilisation lors de crues présente un intérêt de prévention des risques auxquels peuvent être exposés l'environnement, les personnes et les biens.

La synthèse bibliographique a pour objectif d'établir un état des connaissances actuelles à la fois sur la dynamique fluviale, les stocks de sédiments et leur quantification, ainsi que sur la modélisation hydro-sédimentaire, afin de guider l'étude et justifier les choix méthodologiques et analytiques.

I.1. Dynamique fluviale et ses enjeux

I.1.1. Transport solide et équilibre des cours d'eau

Le transport de particules solides par un écoulement liquide est appelé « transport solide » et se répartit en trois phases : érosion, transport et dépôt. Le diagramme de Hjulström (Hjulström, 1935), bien que très simple au regard de la complexité du processus, illustre les trois phases en couplant la vitesse du courant à la taille des particules (Figure 1). Ainsi, le transport de particules grossières nécessite des vitesses plus élevées que le transport de particules fines.

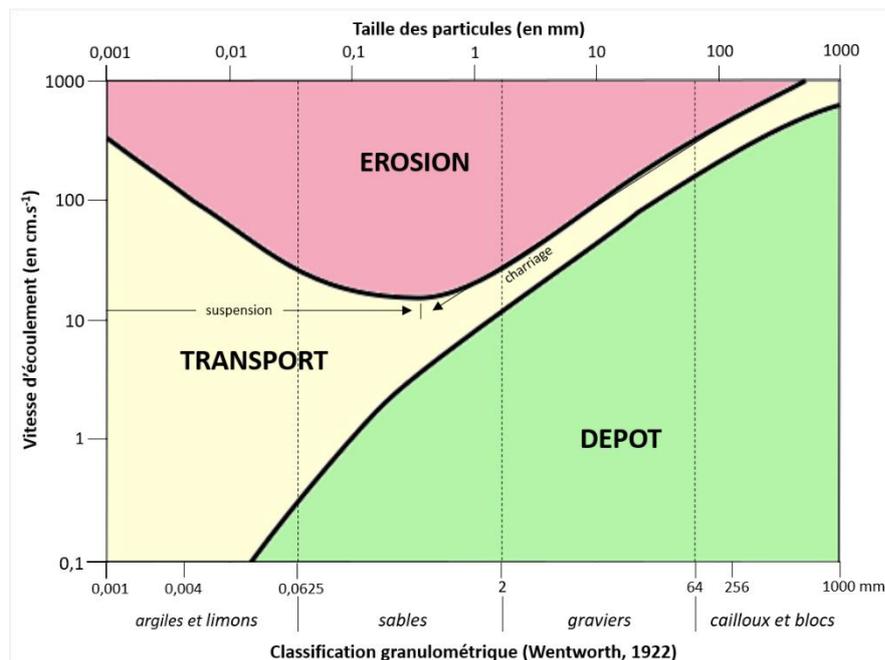


Figure 1 : Diagramme de Hjulström (1935) présentant les phases du transport solide.

Depuis Hjulström, de nombreux travaux ont été menés sur la compréhension des processus physiques, tels que la mise en mouvement des particules (Parker et al., 2003; Recking, 2008; Shields, 1936), ainsi que sur les paramètres spatiaux temporels influençant les écoulements liquide et solide.

Les hydrosystèmes fluviaux sont des systèmes complexes et dynamiques, intégrant un ensemble interdisciplinaire, comme introduit en 1982 (Roux, 1982). Leur dynamique repose notamment sur la recherche d'un équilibre entre le débit liquide - couplé à la pente - et le débit solide - ou charge de fond, couplé à la granulométrie. Comme évoqué en introduction, l'équilibre dynamique d'un cours d'eau dépend de plusieurs variables. Les variables dites de "contrôle" sont liées aux contraintes d'évolution du cours d'eau imposées principalement par la géologie et le climat, tandis que les variables dites de "réponse" correspondent à l'ajustement vis-à-vis de ces contraintes physiques au travers de la géométrie des lits (sinuosité, largeur, etc.), de la granulométrie transportée et de la vitesse du courant (Malavoi et al., 2011). Les principales variables de contrôle sont :

- le débit liquide (Q) : volume d'eau mesuré en une section du bassin versant par unité de temps, exprimé le plus souvent en $m^3.s^{-1}$ ou $l.s^{-1}$;
- le débit solide (Q_s) : masse de matière solide (en solution, en suspension et la charge de fond) mesurée en une section du bassin versant par unité de temps.

La notion d'équilibre dynamique est établie par Lane au travers d'un balancier entre le débit liquide et le débit solide (Lane, 1955) et implique des modifications morphologiques du lit de la rivière dans les trois directions de l'espace. Par exemple, la partie a) de la Figure 2 présente un profil transversal de rivière considérée à l'équilibre hydro-sédimentaire. Si le débit augmente brutalement, comme ce peut être le cas lors d'une crue, alors le cours d'eau peut s'inciser en réponse morphologique à cet événement, afin de réajuster la balance en augmentant le débit solide.

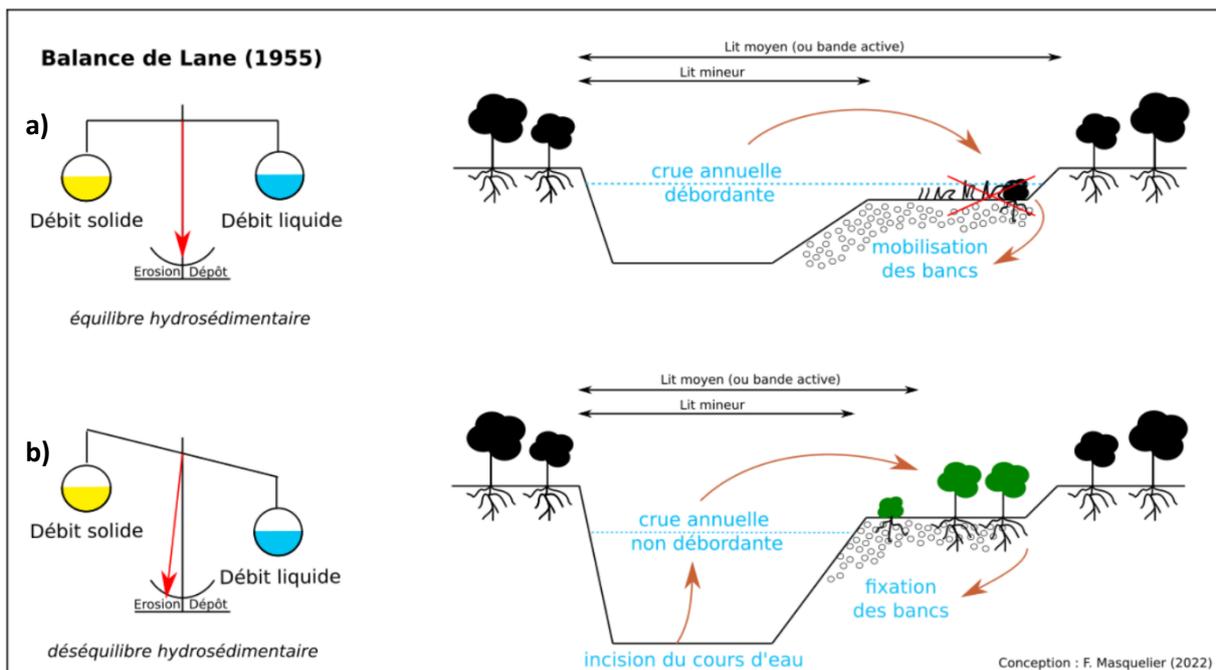


Figure 2 : Schématisation simplifiée de l'effet d'un déséquilibre hydro-sédimentaire sur la morphologie d'un cours d'eau.

A plus ou moins long terme, et comme illustré dans la partie b) de la Figure 2, d'autres changements peuvent s'opérer, tels que la stabilisation des bancs par le développement de végétation là où les crues ne débordent plus, et progressivement la réduction de la mobilité du lit de la rivière. Un exemple concret de ce type est la diminution drastique de la dynamique en tresse dans le bassin Rhône-Méditerranée. Il s'agit de l'un des styles fluviaux, particulièrement développé durant le petit âge glaciaire (PAG, du XVI^e au XIX^e s.), et caractérisé par quatre paramètres, plus ou moins nuancés (Slater, 2007; Terrier & Piégay, 2019): une charge sédimentaire graveleuse ou sableuse abondante, une pente relativement forte, une érodabilité des berges alimentant la charge sédimentaire et des débits variables dans l'année (Bravard & Petit, 1997; Leopold & Wolman, 1957; Schumms, 1977). Néanmoins, à la suite du PAG, plusieurs facteurs – climatiques avec le recul des glaciers et les changements hydrologiques, et anthropiques avec à la fois un reboisement naturel suite à l'abandon du pastoralisme et la construction de barrages réservoirs – ont mené à une rétraction et une incision des lits (Bravard & Peiry, 1993; Piégay, 1995; Terrier & Piégay, 2019).

Les constructions « au fil de l'eau », tels qu'un barrage réservoir, entraînent des modifications de la dynamique hydro-sédimentaire, entre autres, en réduisant la charge sédimentaire en aval et en générant alors un déséquilibre entre la charge disponible et la capacité de transport (Kondolf, 1997). Le terme de capacité de transport est un terme théorique introduit au XIX^es en considérant les cours d'eau comme étant à l'équilibre en chaque section (Wainwright et al., 2015). Il est assimilé au débit solide théorique d'un cours d'eau, calculé en utilisant des formules semi-empiriques de transport. Ainsi, dans un contexte de déficit sédimentaire en amont, le débit solide théorique, ou capacité de transport, est surestimé par rapport au débit solide réel ; une érosion est constatée. A l'inverse, si la capacité de transport est inférieure au débit solide réel alors un dépôt est constaté (Degoutte, 2012).

Ainsi, les réajustements peuvent être d'origine naturelle en faisant suite à des événements relatifs au climat, à la géologie, etc. ou bien ils peuvent être d'origine anthropique.

I.1.2. Enjeux liés au transport solide

Comme présenté précédemment, le transport des sédiments est un processus complexe. Il est néanmoins essentiel d'en comprendre les mécanismes car il est lié à un grand nombre de problématiques majeures en impactant à la fois la morphologie du lit des cours d'eau, les écosystèmes aquatiques et rivulaires et les sociétés, comme présenté dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Liste non exhaustive d'impacts engendrés par l'érosion ou le dépôt de sédiments dans un cours d'eau (Camenen & Melun, 2021; Landon, 1999)

Processus physiques	Impacts physiques	Impacts écologiques	Impacts sociétaux
Erosion	Incision du lit	Dépérissement de la végétation des rives	Déstabilisation d'ouvrages d'art
	Abaissement du niveau de la nappe alluviale	Érosion des biocénoses	Déconnexion des captages
	Disparition des dunes et bancs	Diminution de la capacité d'auto-épuration des cours d'eau par disparition des alluvions au profit du substratum rocheux	Problèmes de navigation
	Modification des habitats		Rupture de digues
Dépôt	Exhaussement du lit	Enfouissement de la végétation des rives et des berges	Risque d'inondations
	Colmatage		Problèmes de navigation
	Modification des habitats	Augmentation des coûts d'entretien (e.g. curage)	

Les sédiments dits « fins » - sables et inférieurs – font l'objet de nombreuses publications du fait des impacts qu'ils engendrent. Les dépôts de ces sédiments modifient les caractéristiques morphologiques d'un cours d'eau en affectant à la fois la rugosité du lit, sa mobilité, ainsi que les échanges entre la surface et les eaux souterraines (Schälchli, 1992; Rehg *et al.*, 2005; Duerdoth *et al.*, 2015). Ensuite, les sédiments constituent une source de nutriments essentiels à la faune aquatique (Domagalski *et al.*, 2021; Droppo *et al.*, 2014; Leonard *et al.*, 1979) mais peuvent contribuer à la dégradation de la qualité de l'eau au-delà d'une certaine quantité de sédiments en suspension (Lisle, 1989). Dans ce cas, leur impact sur les milieux aquatiques est négative car il s'exprime par une augmentation des phénomènes d'eutrophisation (P. N. Owens *et al.*, 2005; Tritthart *et al.*, 2019) ou par de potentiels transferts de polluants (A. Collins *et al.*, 2005; Coynel *et al.*, 2016; Kronvang *et al.*, 2003; P. Owens & Walling, 2002; Rees *et al.*, 1999; D. Walling *et al.*, 2001) qui sont retenus par les particules fines du fait de leurs propriétés physico-chimiques (surface spécifique, capacité d'échanges cationique, etc.) (Gibbs, 1977; Horowitz, 1991; Horowitz & Elrick, 1987).

La législation, au travers de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE, 2000) et depuis 2006 de la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA), prévoit le « bon état des milieux aquatiques [...] et des eaux souterraines ». Cet état inclut un ensemble de paramètres chimiques et écologiques, dont la morphologie et l'hydrologie du milieu qui ne doivent pas être altérés.

I.1.3. Origine et devenir de la charge sédimentaire – cas particulier des sables

Les particules circulant dans les cours d'eau ont des origines variables. Il existe deux types d'apports dit « externes », à savoir les sources primaires – mouvements gravitaires générant un apport de sédiments plutôt grossiers dans la rivière – et les sources secondaires – apports de sédiments de différentes origines par les affluents. Ensuite, le cours d'eau peut lui-même produire des apports, en mobilisant ses propres stocks, disponibles dans les lits mineur à majeur ; on parle dans ce cas d'apports « internes » (Malavoi et al., 2011).

Globalement, de l'amont vers l'aval, les sédiments transportés sont fractionnés du fait de leur entrechoquement. Les particules formant le lit des rivières peuvent être caractérisées par leur forme et leur rugosité en surface. En s'appuyant sur un axe de référence des particules, à savoir celui qui permet ou non de passer à travers les mailles d'un tamis, des classifications granulométriques ont été définies et permettent de distinguer les sédiments selon leur taille. La classification de Wentworth (Wentworth, 1922) est communément utilisée et définit les sables comme étant les particules de diamètre compris entre 62.5 μm et 2 mm (Annexe 1).

La granulométrie d'une rivière est déterminée selon la fréquence d'occurrence des particules de chaque taille. La distribution granulométrique est ensuite représentée par des courbes de fréquences cumulées, la plupart du temps en semi-log au vu de l'étendue granulométrique possible. Ces courbes permettent ensuite d'obtenir des valeurs dites « caractéristiques » telles que le diamètre médian, noté d_{50} , et correspondant à la fréquence cumulée de 50 %, ainsi que les d_{16} et d_{84} correspondant respectivement aux fréquences cumulées 16 et 84% (Camenen & Melun, 2021). Les valeurs ainsi obtenues sont utilisées dans les équations de transport solide, afin de déterminer, notamment, la force hydrodynamique nécessaire pour mettre les particules en mouvement.

Néanmoins, dans les équations, qui sont des applications théoriques de phénomènes réels, un ensemble de simplifications sont nécessaires. Les particules sont, par exemple, assimilées à des sphères parfaites, ce qui n'est pas le cas. Ensuite, une valeur unique, telle que le d_{50} , est utilisée comme diamètre unique, ne traduisant alors pas les gradients granulométriques. Il existe pourtant une grande variabilité spatiale de la granulométrie, aussi bien dans la colonne d'eau que dans le lit fixe.

La Figure 3 représente schématiquement une rivière avec un écoulement de la gauche vers la droite. Les flèches noires traduisent le mouvement des particules. Dans la colonne d'eau, une partie des particules est transportée en suspension. Ce mode de transport nécessite de compenser le poids des particules par une vitesse verticale d'entraînement : les turbulences. Ainsi, seules les particules

« fines », à savoir, les sables et inférieures, peuvent être transportées de la sorte (cf. Diagramme de Hjulström en Figure 1). La suspension est dite « graduée », avec globalement des concentrations en sédiments plus élevées en bas de colonne et plus faibles en haut. Cela n'est néanmoins pas toujours le cas, car le gradient dépend d'autres éléments tels que les vitesses de chute et de cisaillement (Van Rijn, 2007).

A proximité du lit fixe, les particules sont transportées par charriage. On peut distinguer le roulement, le glissement et la saltation – déplacement des particules par sauts. La vitesse de déplacement augmente avec l'augmentation de la vitesse du courant.

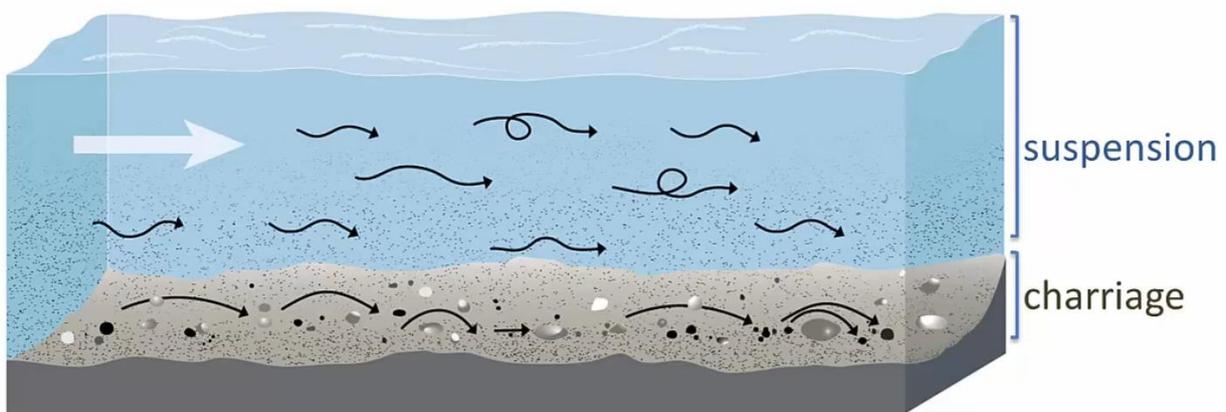


Figure 3 : schématisation des modes de transport des sédiments dans une rivière. Source : UNIT (web TV), 2014

I.2. Stocks sédimentaires

Comme évoqué précédemment, il existe une variabilité de la granulométrie dans la colonne d'eau, mais également dans les trois directions du lit d'un cours d'eau : longitudinalement, latéralement et verticalement ; ainsi qu'à différentes échelles : tronçon, section et échelle locale (Bunte & Abt, 2001b). Une succession de radiers et mouilles sur un tronçon influence le transport solide, avec de l'érosion aux radiers par accélération de l'écoulement, et du dépôt aux mouilles par décélération.

La morphologie du lit d'un cours d'eau induit donc des vitesses variables dans l'espace, qui influencent les phases et les modes du transport solide. Ainsi, les sédiments peuvent être stockés à plus ou moins long terme dans le lit. Les bancs constituent l'une des macroformes de dépôts.

I.2.1. Variabilité verticale du lit fixe : les types de stocks

Verticalement, les sédiments peuvent présenter différentes organisations. Dans les cas où l'étendue granulométrique est relativement élevée, c'est-à-dire que se côtoient des particules de tailles très variables, on retrouve globalement trois grands types de stocks (Figure 4).

Dans le premier cas (Figure 4 a) le stock de sable est principalement localisé en sub-surface. La surface est dite armurée. La formation de l'armurage est progressive et due à l'entraînement uniquement de la matrice sableuse par l'écoulement (Degoutte, 2012).

Dans le second cas (Figure 4 b), le stock de sables est réparti en surface et/ou sub-surface, sous la forme d'une matrice sableuse. Du colmatage est possible, notamment en surface, limitant alors le stock en sub-surface.

Dans le dernier cas (Figure 4 c), un dépôt de sable est visible en surface.

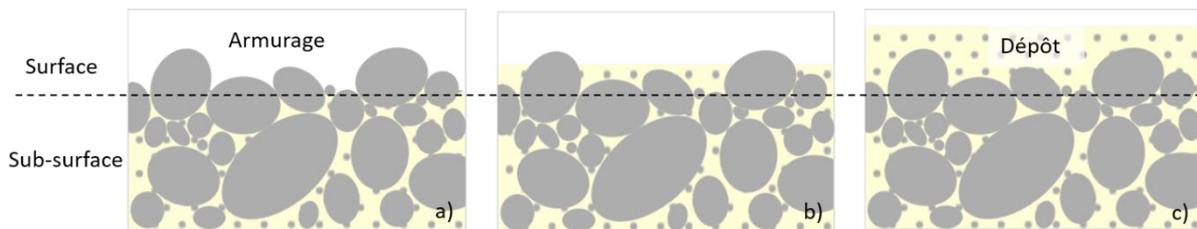


Figure 4: Types de stocks de sables dans les rivières à graviers. a) armurage en surface. b) matrice sableuse, avec possibilité de colmatage en surface et pas en sub-surface. c) dépôt de sable en surface. D'après Bunte and Abt, 2001b.

I.2.2. Quantification et évaluation des stocks de sédiments

Du fait de l'importance des sédiments dans la dynamique des cours d'eau ainsi que des enjeux liés à leur stockage et à leur mobilisation lors de crues ou chasses de barrages, la problématique de quantification des sédiments et d'évaluation des stocks apparaît comme un besoin dans la compréhension de l'hydrosystème fluvial et la gestion des risques associés.

Les prémices de cette problématique semblent apparaître dans les années 70-80, avec les travaux de Wolman (Wolman, 1977) mettant en avant l'importance de la variabilité spatio-temporelle du comportement des sédiments. Les résultats obtenus par les méthodes de l'époque sont cependant peu représentatifs des variations spatiales dans les bassins versants car ils consistent en la mesure des rendements sédimentaires (en $t.km^{-2}.an^{-1}$) aux exutoires (D. E. Walling, 1983), et ne prennent alors pas en compte le stockage, qui est pourtant essentiel, comme souligné dans les travaux de Meade (Meade, 1982).

La quantification des sédiments d'une zone d'intérêt nécessite simplement cinq étapes (Kellerhals & Bray, 1971) :

- Choix du site et du moment d'échantillonnage,
- Prélèvement d'échantillons,
- Détermination de la taille des grains,
- Calcul de la distribution granulométrique,
- Présentation des résultats.

Diverses méthodes de prélèvement sont néanmoins proposées dans la littérature, et le choix du site n'est pas trivial.

Plusieurs méthodes consistent à mettre en place des pièges à sédiments qui sont ensuite prélevés (Acornley & Sear, 1999; P. Carling & McCahon, 1987; A. L. Collins et al., 2013; Davey et al., 1987; Kozerski, 2002; Soulsby et al., 2001; D. E. Walling et al., 2003; Wood & Armitage, 1999). Cela permet de quantifier temporellement le processus de dépôt, mais pas les volumes totaux de sédiments mobilisables.

La quantification des dépôts à un instant donné est possible en utilisant d'autres méthodes, qui prennent en compte le volume des sédiments, sur une profondeur dépendante de la méthode.

La méthode de carottage cryogénique (ou *freeze coring*) est une méthode de prélèvement relativement fréquemment utilisée dans les lits de rivières (P. A. Carling & Reader, 1981; Lambert & Walling, 1988; Walkotten et al., 1976). Il s'agit de la congélation in situ de sédiments de surface à l'aide d'un mélange de neige carbonique et d'un liquide à faible point de congélation (e.g. alcool) utilisé comme agent de refroidissement. Cette méthode est très précise puisqu'elle limite les perturbations et évite la perte de particules fines par gravité. Néanmoins, il s'agit d'une méthode très coûteuse et chronophage (Descloux et al., 2010).

L'étude du colmatage dans les habitats piscicoles a mené au développement d'outils de prélèvement des sédiments fins tels que le tube de McNeil (McNeil & Ahnell, 1964), par la suite adapté dans de nombreux travaux de recherche (A. L. Collins & Walling, 2007; Estrany et al., 2011; Lambert & Walling, 1988; Marttila & Kløve, 2014; P. N. Owens et al., 1999; Quinn et al., 1997; Wagenhoff et al., 2011). Un cylindre est enfoncé, selon l'étude, de 5 à 15 cm dans le lit immergé de la rivière afin de contenir un volume connu de sédiments qui est alors agité afin de mettre en suspension les particules fines – ou matières en suspension « MES » - et ainsi pouvoir les échantillonner. La

concentration en MES dans l'échantillon de volume connu permet, en étant rapportée au volume contenu dans le cylindre, de définir la masse de MES dans l'échantillon total.

D'autres méthodes s'appuient sur des techniques telles que la détermination de la fraction granulométrique de surface à l'aide d'un gabarit Wolman, ou encore une estimation visuelle du pourcentage de chaque fraction (Clapcott et al., 2011). Ces méthodes sont néanmoins considérées comme très subjectives (Bunte & Abt, 2001a; Duerdoth et al., 2015).

Pour toute méthode de prélèvement, la zone échantillonnée doit être représentative de l'ensemble du site choisi, ou du moins d'un secteur du site auquel cas il convient d'échantillonner l'ensemble des secteurs. En effet, l'évaluation des stocks totaux requiert une extrapolation spatiale des données ponctuelles obtenues après prélèvement (Lambert & Walling, 1988). Un changement d'échelle est nécessaire entre les mesures quantitatives des sédiments réalisées à petite-échelle (i.e. surface des cylindres ou cadres de prélèvement) et la zone d'étude dont l'échelle est plurikilométrique. La difficulté de cette démarche est mise en avant dans les travaux menés par Larsen (Larsen et al., 2009). Ainsi, des méthodes incluant les variabilités spatiales des bancs sont proposées (Deng et al., 2022; Misset et al., 2021; Navratil et al., 2010). Il s'agit de délimiter des zones homogènes sur chaque banc étudié, de réaliser plusieurs prélèvements représentatifs de chaque zone, et de mesurer les masses de sédiments de chaque classe granulométrique. La délimitation des zones peut s'effectuer à l'aide de photographies aériennes (Misset et al., 2021; Navratil et al., 2010), ou en combinant un modèle numérique de terrain, réalisé à partir de données LiDAR, avec des photographies (Deng et al., 2022). Les données obtenues permettent alors le calcul d'un stock local (S_t) selon l'Équation (1).

$$S_t = \frac{M_{sédiments}}{A \times H} \quad (1)$$

où $M_{sédiments}$ est la masse des sédiments prélevés, A est l'aire échantillonnée et H est la hauteur creusée pour le prélèvement.

Cette équation est à adapter selon la fraction granulométrique des stocks d'intérêt.

Dans la plupart des méthodes présentées, la fraction granulométrique quantifiée est principalement la fraction des fines, n'incluant pas nécessairement les sables. Deng *et al.* (2022) propose de quantifier les sédiments fins, dont les sables, en adaptant le protocole d'échantillonnage de Misset *et al.* (2021). Les prélèvements sont alors réalisés sur une surface délimitée par un cadre de 30x30 cm et, sur la base des travaux de Navratil *et al.* (2010) et Misset *et al.* (2021), une distinction est faite entre la couche de surface et la couche de sub-surface, afin d'affiner l'analyse spatiale des sédiments. Chaque échantillon est ensuite tamisé sur le terrain afin de connaître la distribution

granulométrique de la zone homogène. Le calcul du stock local est modifié en surface afin de ne pas faire intervenir la hauteur creusée qui est considérée comme trop incertaine (Deng et al., 2022). Il est alors calculé selon l'Équation (2).

$$S_{t, \text{ surface}} = \frac{M_{\text{sédiments}}}{A} \quad (2)$$

Ensuite, les stocks locaux d'une même zone homogène sont moyennés afin d'obtenir une valeur de stock pour la zone en question, en étendant le stock moyen à la surface de cette zone. Finalement, le stock total est estimé en additionnant les stocks de chaque zone homogène.

1.2.3. Remobilisation des sédiments

Les sédiments stockés peuvent être mobilisés lors d'événements de crues. Comme présenté précédemment (cf. 1.1.), la mise en mouvement des particules dépend de leur taille ainsi que de l'écoulement. La force exercée par ce dernier sur le lit de la rivière est appelée contrainte de cisaillement au fond, et agit sur les sédiments. Il peut être calculé à l'aide de la loi de Manning-Strickler présenté en Équation (3) (Camenen & Melun, 2021).

$$\tau_f = \frac{\rho g U^2}{K_s^2 R_h^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

où ρ est la masse volumique de l'eau, g est l'accélération de la pesanteur, U est la vitesse du courant dans la direction de l'écoulement, K_s est le coefficient de Strickler global et R_h est le rayon hydraulique.

La contrainte ainsi obtenue est essentielle dans la compréhension des processus de remobilisation mais peut néanmoins être biaisée par l'utilisation du coefficient de Strickler global K_s . C'est pourquoi Meyer-Peter et Müller (1948) proposent de calculer la contrainte de cisaillement effective τ_{eff} (Équation (4)).

$$\tau_{eff} = \left(\frac{K_s}{K_{sg}} \right)^{\frac{3}{2}} \tau_f \quad (4)$$

où K_{sg} est le coefficient de Strickler de peau, déterminé à partir de la granulométrie et calculé selon l'Équation (5) (Camenen & Melun, 2021).

$$K_{sg} = \frac{21}{d_{50}^{\frac{1}{6}}} \approx \frac{26}{d_{90}^{\frac{1}{6}}} \quad (5)$$

Ensuite, il est possible de déterminer le début d'entraînement des particules, à savoir lorsque la contrainte critique de cisaillement est dépassée, par le calcul du paramètre de Shields θ (Équation (6)) (Camenen & Melun, 2021).

$$\theta = \frac{\tau_f}{(\rho_s - \rho)gd} \quad (6)$$

Enfin, le paramètre de Shields intervient dans le calcul de de l'épaisseur d'érosion, notée δ ou δ_b dans la littérature (Équation (7)) (Camenen et al., 2009; Wilson, 1989).

$$\delta_b = 5\theta d_{50} \quad (7)$$

Néanmoins, il convient de considérer d'autres éléments dans l'étude de la remobilisation des sédiments.

L'effet de *hiding* est un phénomène mettant en avant l'importance de l'étendue granulométrique dans le processus de transport solide (McCarron et al., 2019). En effet, des particules grossières peuvent masquer des particules plus fines, et alors empêcher leur mobilisation. C'est notamment le cas en présence d'armurage. Une mobilisation des stocks de sable de sub-surface nécessite dans un premier temps une mobilisation des éléments grossiers ; de même lorsque les sables sont infiltrés et forment une matrice sableuse. Si les éléments grossiers ne sont pas mobilisés dans le second cas, alors un armurage se forme progressivement.

Les dépôts de surface constituent le type de stockage le plus facilement mobilisable. Néanmoins, leur position influence leur capacité à être remobilisés. En effet, un dépôt localisé en haut de banc nécessite, pour être mobilisé, un évènement induisant une hauteur d'eau qui atteint cette altitude.

Ensuite, la présence de végétation joue un rôle dans la rétention des sédiments fins, sables inclus, et constitue de fait un frein à la remobilisation des stocks (Cotton et al., 2006; Gurnell & Bertoldi, 2022; Vargas-Luna et al., 2015).

Finalement, les sédiments remobilisés sont transportés en suspension ou charriage (*cf.* Paragraphe I.1.3) avant de se déposer en aval. Sur le Rhône, un épisode de crue est survenu en janvier 2018, dont le flux de sable mesuré en suspension à la station Lyon-Perrache équivaut à près de 175 000 tonnes (Dramais, 2020). Les sables ont été supposés provenir de l'Ain, mais aucune étude n'a pour le moment été menée pour confirmer cette hypothèse.

I.3. Modélisation hydro-sédimentaire

Dans l'optique de mieux comprendre et d'anticiper la dynamique hydro-sédimentaire du Rhône, un modèle numérique est développé depuis 2012 (Andries et al., 2012). Il s'étend du lac Léman jusqu'à la mer Méditerranée, soit sur près de 550 km, et tient compte de la présence d'aménagements au fil de l'eau. Son développement s'intègre aujourd'hui dans les axes de recherche de l'OSR (Observatoire des sédiments du Rhône), et l'objectif final est la simulation de flux de MES (Le Coz et al., 2021).

L'outil numérique s'appuie sur les codes de calcul unidimensionnels en écoulement instationnaire MAGE et AdisTS, en considérant l'écoulement selon l'axe de la rivière. Le logiciel MAGE permet la simulation d'inondations et de crues par la résolution des équations de Barré de Saint-Venant, en tenant compte de la géométrie du cours d'eau (Faure, 2016). Une interface graphique, nommée PamHyr, aide à l'utilisation du code de calcul. En entrée, l'utilisateur fournit les débits et/ou hauteurs d'eau en amont et en aval du tronçon d'intérêt. En sortie, le modèle fournit, pour chaque section de chaque bief, la vitesse d'écoulement, et le rayon hydraulique - déduit de la hauteur d'eau moyenne.

II. Matériel et méthodes pour l'estimation de stocks de sables

II.1. Présentation du secteur d'étude

Le Rhône compte parmi les plus grands fleuves d'Europe. Il parcourt en effet près de 810 km depuis sa source, en Suisse (glacier de la Furka), à son embouchure en Mer Méditerranée (Camargue, France). La surface de son bassin versant est de 96 500 km², ce qui en fait un bassin hétérogène complexe. En effet, les variabilités topographiques et climatiques le long de son tracé induisent une délimitation du cours d'eau en cinq entités principalement (ZABR, 2008): Rhône alpestre, Haut Rhône français, Rhône moyen, Rhône inférieur et Delta, définies depuis l'amont vers l'aval.

Le Rhône est fortement influencé avec 18 barrages le long de sa partie française. En conséquence, le transport solide y est fortement réduit (SOGREAH, 2000) ; il ne reste que peu de zones où un transport solide existe encore, le secteur du Haut Rhône français entre la confluence avec l'Ain et Lyon en est le principal représentant. La zone dans laquelle les stocks de sables sont évalués se situe dans ce Haut Rhône français, entre la confluence Ain-Rhône et le Seuil de Villeurbanne (Figure 5).

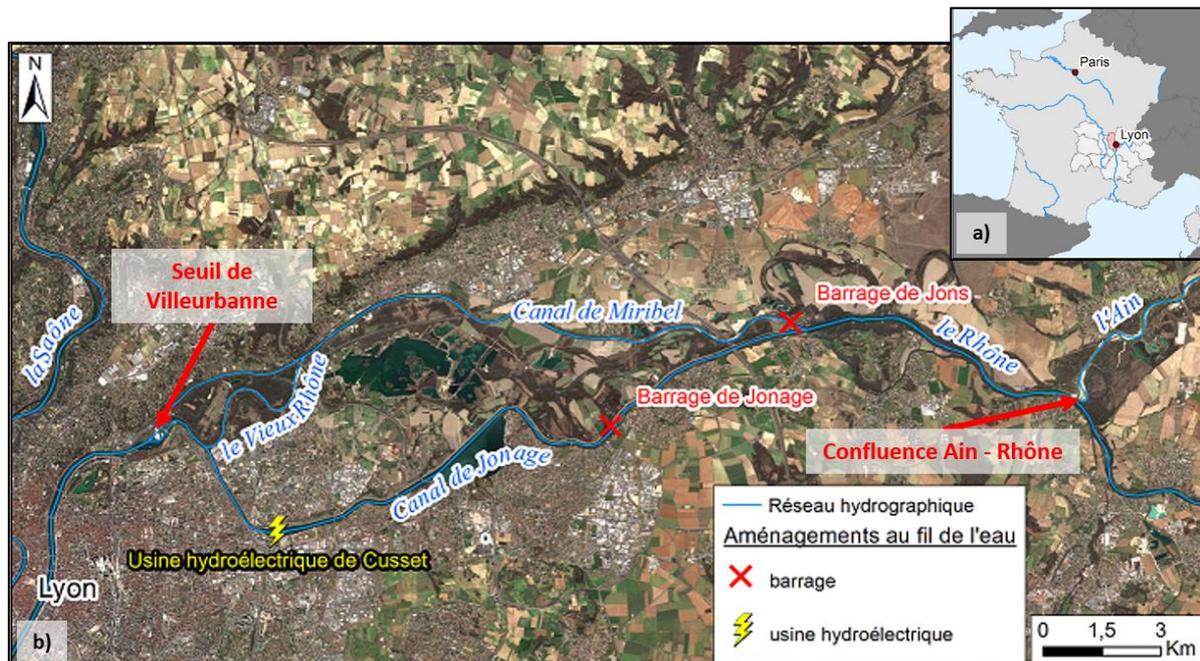


Figure 5: Localisation de la zone d'étude. a) Carte de France localisant Lyon en région Auvergne Rhône-Alpes, dans le département du Rhône. b) Image Sentinel 2 prise le 8 mars 2022 et annotée. Source: Copernicus.

Le contexte géologique des alentours de Lyon présente des hétérogénéités qui apparaissent sur la carte géologique à 1/1 000 000 par une diversité de couleurs (Figure 6 a) : Massif Central à l'ouest, et plus particulièrement les Monts du Lyonnais, fossé de la Bresse au nord, Bas-Dauphiné au sud, et Plaine de l'Est Lyonnais à l'est. La zone d'étude se caractérise plus précisément par des dépôts alluvionnaires fluviaux et fluvio-glaciaires (Figure 6 b), hérités de la dynamique passée du Rhône, et

notamment liés à la présence de lobes glaciaires dans le couloir rhodanien lors de la dernière période glaciaire – le Würm – puis liés à l'écoulement d'importantes quantités d'eau de fusion des glaciers ayant une action érosive importante en contexte périglaciaire (Coutterand et al., 2009).

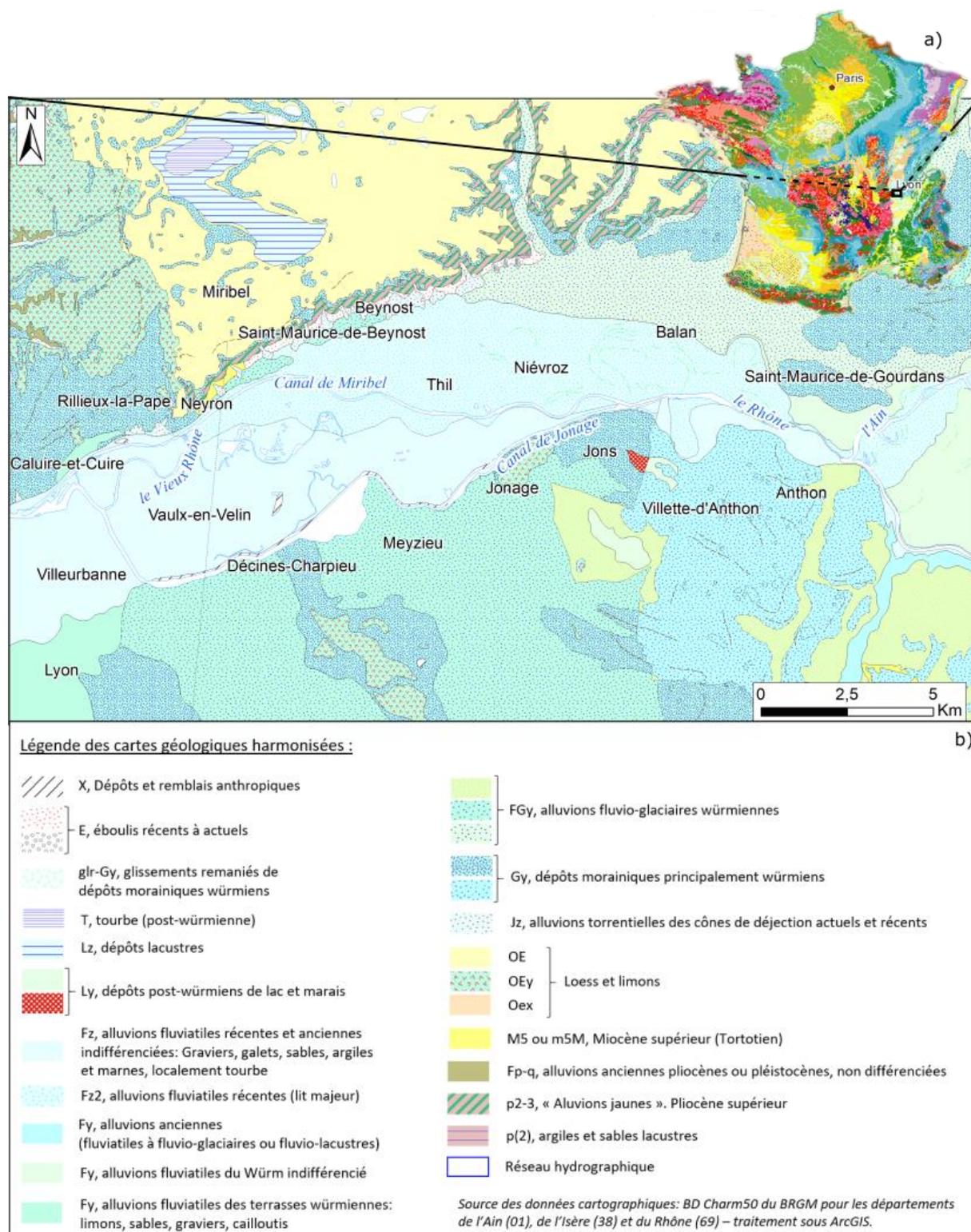


Figure 6: Cartes géologiques localisant le Rhône Amont (vallée du Rhône en amont de Lyon). a) Extrait de la carte géologique de France à 1/1 000 000. b) Carte géologique harmonisée à 1/50 000 du Rhône Amont (zone d'étude).

Ainsi, la répartition des formations alluvionnaires du Rhône montre l'étalement naturel du cours d'eau dont le style fluvial était en tresse (cf. Annexe 2). L'urbanisation progressive de l'agglomération de Lyon et la volonté de développer la navigation dans le fleuve s'est traduite par des aménagements du Rhône au XIXe siècle (Combe, 2004; Poinart, 1992). Dans le secteur étudié, le Rhône est divisé entre le Canal de Miribel et le Canal de Jonage (Figure 5). La zone située entre les deux bras constitue la plaine d'inondation du Rhône. Il s'agit d'un secteur ZNIEFF de type 2, voire 1, occupé principalement par des surfaces agricoles, des forêts et des plans d'eau, excepté sur la commune de Vaulx-en-Velin, qui constitue un tissu urbain (Figure 7). Le Vieux Rhône est une portion plus naturelle du fleuve, qui lie les canaux de Miribel et de Jonage. Ses alentours sont protégés puisqu'il s'agit des champs-captant de Crépieux-Charmy, gérés par Eau du Grand Lyon et alimentant en eau potable l'agglomération. Cette zone constitue un enjeu majeur du territoire.

La séparation du Rhône en deux canaux, ainsi que la présence du barrage de Jons en amont du canal de Miribel et la présence du barrage hydroélectrique de Jonage sur le canal de Jonage, jouent un rôle dans la mobilité des sédiments (Figure 5 a). En effet, le canal de Jonage présente un débit liquide stabilisé autour de $550-600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour la production à la Centrale hydroélectrique de Cusset, et le canal de Miribel présente un débit fluctuant en fonction du débit total du Rhône amont (entre le débit réservé fixé à $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ l'été et plusieurs centaines de $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (Agence de l'Eau RMC et al., 2014). Les conséquences dans le canal de Miribel sont telles que des réajustements du cours d'eau peuvent s'effectuer plus fréquemment, avec tantôt des phases de dépôt, et tantôt des phases de reprise.

En amont de la confluence de la Saône, localisée à Lyon, le bassin versant du Rhône présente une superficie de $20\,300 \text{ km}^2$. Son débit annuel moyen, ou module, est de $585 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dont 30 à $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sont réservés pour le canal de Miribel et le Vieux-Rhône afin, notamment, de limiter les fluctuations de la nappe alluviale du Rhône exploitée pour l'alimentation en eau potable. Le régime hydrologique du Haut-Rhône est un régime relativement complexe dans lequel on retrouve les caractéristiques des régimes pluvial et nivo-glaciaire. Il est en effet caractérisé par des hautes eaux en hiver et un étiage en fin d'été, ainsi que par une augmentation des débits au printemps, avec la fonte des neiges et glaces en amont (Figure 8).

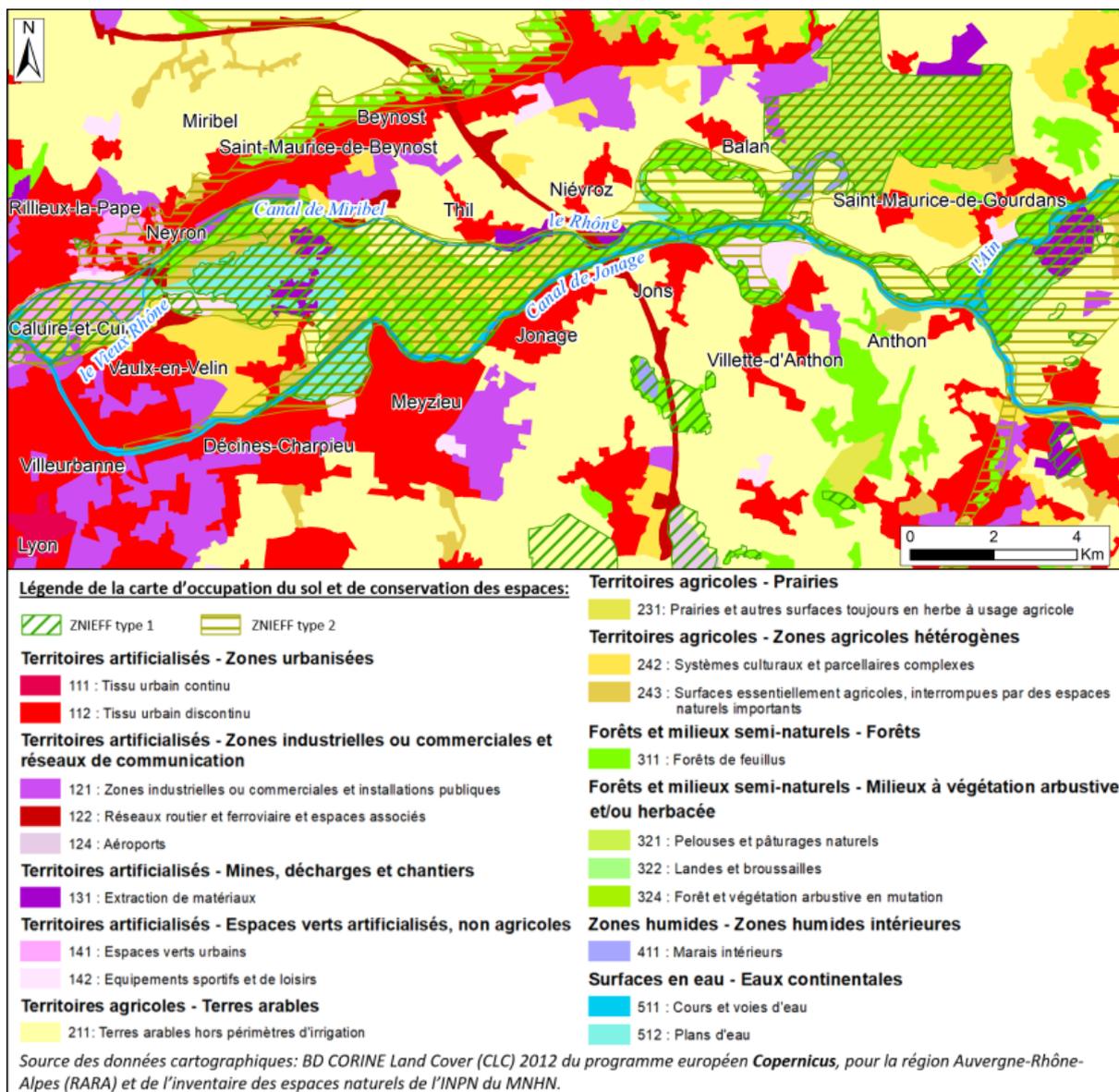


Figure 7: Carte d'occupation du sol et de conservation des espaces naturels dans le Rhône Amont (vallée du Rhône en amont de Lyon).

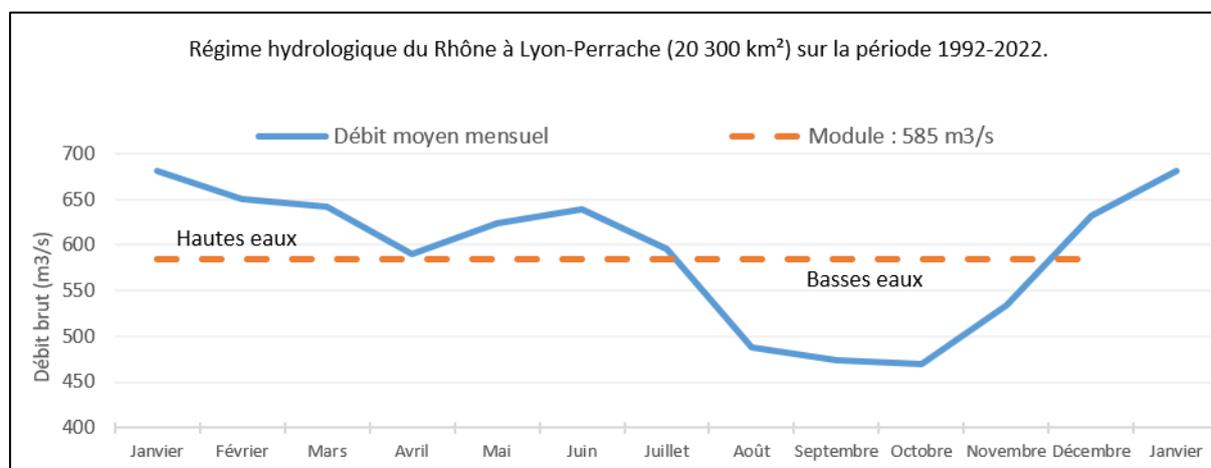


Figure 8: Synthèse hydrologique à Lyon-Perrache. Données de la CNR, disponibles sur hydro.eaufrance.fr

II.2. Protocoles de mesures

L'évaluation des stocks de sable nécessite l'acquisition de données, à la fois sur les fractions granulométriques des bancs, et sur la répartition spatiale de zones homogènes de stockage. Ainsi, plusieurs protocoles d'échantillonnage sont suivis sur le terrain afin notamment de comparer les résultats obtenus. Les échantillonnages sont couplés à une analyse spatiale et une modélisation hydro-sédimentaire.

II.2.1. Echantillonnage des bancs immergés

Peu de méthodes permettent la quantification des particules fines dans les bancs immergés. Le cylindre de prélèvement (McNeil & Ahnell, 1964) présente cet intérêt, à condition que la hauteur d'eau ne dépasse pas un certain niveau légèrement plus faible que la hauteur du dispositif. Le protocole suivi pour l'échantillonnage est donc adapté des méthodes existantes (*cf.* Paragraphe I.2.2.).

Le dispositif utilisé pour le prélèvement en banc immergé est un cylindre en acier de 65.5 cm de hauteur et de 14.5 cm de diamètre (Figure 9). Une tige amovible permet de faciliter son utilisation, de même que son extrémité dentée qui constitue également un repère clef lors du prélèvement. Le cylindre est gravé à 15 cm du haut des « dents », marquant la profondeur de prélèvement.



Figure 9: Utilisation en eau et présentation du cylindre de prélèvement (McNeil & Ahnell, 1964).

Le dispositif est enfoncé de 15 cm dans le banc immergé, et plusieurs mesures sont réalisées : hauteur d'eau moyenne autour du dispositif, hauteur d'eau moyenne dans le dispositif et hauteur d'air. Les sédiments désormais contenus dans le tube sont prélevés jusqu'à atteindre les dentelures et sont disposés dans des seaux avant analyse granulométrique sur le terrain (*cf.* Paragraphe II.3.1.). La hauteur d'eau à l'intérieur du dispositif est de nouveau mesurée, après prélèvement, pour

s'assurer de la profondeur échantillonnée et ainsi déterminer le volume de sédiments prélevé. Un premier échantillon d'eau est prélevé dans le tube après mise en suspension des particules les plus fines. Cela a pour but d'estimer la quantité de fines dans l'échantillon, pour un volume d'eau connu – fonction de la section du tube et de la hauteur d'eau.

II.2.2. Echantillonnage des bancs émergés

II.2.2.a. Méthode « des placettes »

La méthode proposée par Deng (Deng et al., 2022) pour quantifier les sédiments fins - argiles à graviers - est appliquée sur les bancs émergés. Sur le terrain, des placettes sont disposées en différentes zones homogènes du banc. Les placettes d'échantillonnage de Deng sont des cadres de 30 cm par 30 cm permettant de délimiter la zone à échantillonner (Figure 10). Ensuite, deux couches sont distinguées : une couche de surface d'épaisseur H_1 estimée à $H_1 = 2d_{90} \approx 0.05$ m reposant sur une couche de sub-surface d'épaisseur H_2 estimée à $H_2 = 2H_1 \approx 0.10$ m (Deng et al., 2022). L'opérateur creuse pour récupérer dans un premier temps l'ensemble des sédiments de surface, puis les sédiments de sub-surface. Les deux échantillons obtenus sont disposés dans des seaux avant analyse sur le terrain (cf. Paragraphe II.3.1).

Afin d'estimer le volume de sédiments prélevés en surface puis en sub-surface, la profondeur moyenne creusée est mesurée à l'aide d'une règle graduée. De plus, une bâche étanche souple est disposée dans la zone d'échantillonnage, puis un volume d'eau est versé jusqu'à atteindre le bas de la placette. La différence de volume d'eau correspond au volume de sédiments échantillonnés pour l'échantillon de sub-surface.



Figure 10: Prélèvement d'échantillons de surface et sub-surface selon la méthode « des placettes » (Deng et al., 2022).

II.2.2.b. Tube « McNeil »

Une méthode d'échantillonnage supplémentaire est testée sur bancs émergés à l'aide du cylindre de prélèvement. Il s'agit de suivre le protocole d'échantillonnage pratiqué en banc immergé (cf. Paragraphe II.2.1.), mais cette fois-ci hors de l'eau. Les échantillons obtenus sont ensuite analysés selon les mêmes procédés que ceux prélevés selon la méthode « des placettes », présentés par la suite (cf. Paragraphe II.3.1.).

II.2.3. Acquisitions GPS et zonation des bancs

L'échantillonnage est couplé à l'acquisition de données GPS à l'aide d'un capteur GPS de la marque *Leica Geosystems*, modèle GX1230 (Figure 11). L'outil est principalement constitué d'un capteur, d'un terminal et d'une antenne fixée sur une perche de 2 mètres et reliée au capteur.

Le terminal, ou télécommande, permet à l'utilisateur de choisir le système de coordonnées (i.e. RGF 93 – CC46 2018), la configuration (i.e. RTK Real Time Kinematic), et les paramètres de sauvegarde des points. Le GPS est connecté à Orphéon, un réseau permettant, en temps réel, la correction et l'amélioration des géo positions grâce à l'ensemble des stations d'observations fixes qui le composent. Les points sont acquis avec une précision de l'ordre de 10 cm, mais qui diminue jusqu'à 2 m en présence de végétation dense.



Figure 11 : Acquisition de données GPS à l'aide d'un capteur GPS GX1230 – Leica Geosystems, 2004.

Tout le pourtour des bancs est délimité par des points GPS, en suivant la ligne d'eau et la végétation de berge. Le pas peut varier de 5 à 15 mètres en fonction de la taille du banc et de la qualité du réseau capté par le capteur GPS.

Une observation visuelle de la granulométrie de surface est également réalisée sur chaque banc, et des zones supposées homogènes sont délimitées dans le cas où des différences notables sont repérées sur un même banc. Ces différences peuvent inclure : un changement de faciès (i.e. observation d'un dépôt de sable de dimension importante relativement à la taille du banc), un changement granulométrique net, une nappe de charriage, la présence de végétation sur le banc.

La zonation est supportée par la mesure de la granulométrie de surface (Wolman, 1954). Cent particules au minimum sont prélevées aléatoirement selon un pas de plusieurs décimètres à 1 mètre en fonction de la granulométrie : le pas est plus grand pour des particules majoritairement grossières. Chaque particule est mesurée à l'aide d'un gabarit et la valeur du plus petit diamètre passant est notée (Figure 12). Le prélèvement aléatoire est effectué en récoltant la première particule au contact du doigt, tout en ayant le regard détourné afin de ne pas introduire de biais dans l'échantillonnage.

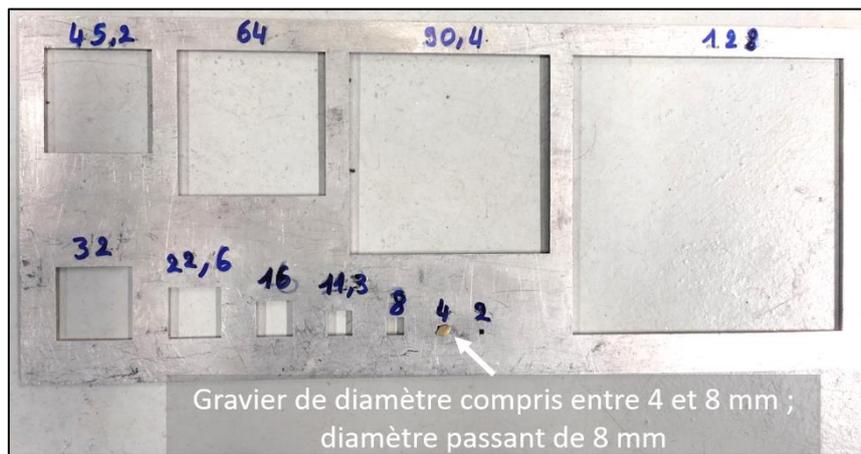


Figure 12 : Gabarit pour la mesure de la granulométrie de surface selon la méthode de Wolman [1954].

II.3. Méthodes d'analyse des échantillons

II.3.1. Analyse sur le terrain

Deng *et al.* (2022) propose d'analyser la granulométrie des sédiments in situ, afin de quantifier les particules depuis les argiles jusqu'aux graviers.

Le même protocole d'analyse est suivi indépendamment du type de prélèvement, méthode de McNeil & Ahnell (1964) ou Deng *et al.* (2022).

Les échantillons sont tamisés un à un, par lavage à l'eau, sur une colonne de quatre tamis disposée au-dessus d'un seau récoltant les particules les plus fines. Le volume d'eau de tamisage est mesuré en fonction du nombre d'arrosoirs utilisés pour le lavage, sachant que leur volume est de 6 litres.

Le tamisage est réalisé à l'aide d'une colonne de quatre tamis (Figure 13). Le dispositif permet la séparation de l'échantillon en cinq fractions granulométriques a minima : $> 10 \text{ mm}$, $2\text{-}10 \text{ mm}$, $500 \mu\text{m} - 2 \text{ mm}$, $100 \mu\text{m} - 500 \mu\text{m}$ et $< 100 \mu\text{m}$. Des distinctions supplémentaires peuvent être réalisées pour les éléments les plus grossiers à l'aide du gabarit Wolman à 45.2 mm , voire plus si nécessaire, en respectant un facteur 4-5 entre les classes granulométriques.

A l'issue du tamisage, les MES sont remises en suspension dans le seau, en veillant à l'homogénéisation de l'eau turbide. Un sous-échantillon de 500 ml est prélevé, dans le but de quantifier les MES de l'échantillon total.

Les refus des tamis à 10 et 2 mm sont pesés sur le terrain, en négligeant la masse de la pellicule d'eau due au tamisage (Figure 13).



Figure 13 : Dispositifs pour l'analyse de la granulométrie des échantillons : tamisage à 10mm , 2mm , $500\mu\text{m}$ et $10\mu\text{m}$; pesée des particules de diamètre supérieur à 2mm .

II.3.2. Analyse en laboratoire

Les sédiments de granulométrie inférieure à 2 mm présentent après lavage une teneur en eau trop importante pour être négligée dans la masse de l'échantillon. Ils sont donc disposés dans des seaux et/ou sachets d'échantillonnage afin d'être séchés et pesés au laboratoire. Le séchage complet s'effectue par un passage de plusieurs heures à l'étuve, dépendant de la quantité d'eau dans l'échantillon, à une température de 100 à $105 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figure 14 a). Ensuite, chaque échantillon est pesé dans son contenant de masse connue, sur une balance de table *Kern EMS* de résolution 1 g .

Pour estimer la masse de l'ensemble des particules inférieures à 100 µm dans chacun des échantillons, il convient de déterminer leur concentration en solution, à partir des sous-échantillons liquides prélevés sur le terrain (cf. Paragraphe II.3.1.). La quantification de la teneur en MES suit le protocole normé NF EN 872. Pour chaque sous-échantillon liquide, un volume précis à 2.5 ml près est filtré à l'aide d'une pompe à vide avant d'être séché durant 2 h à l'étuve (104 °C), puis pesés sur une balance de précision *Sartorius CPA225D* de résolution 0.01mg (Figure 14 b et c).

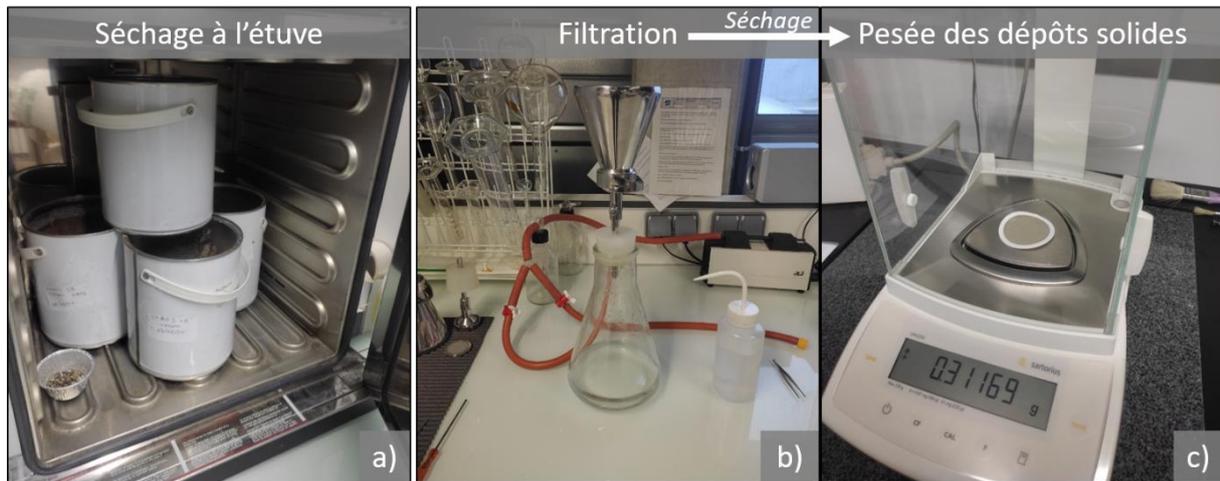


Figure 14 : Outils pour l'analyse en laboratoire. a) étuve pour le séchage des sédiments ; b) dispositif de filtration des matières en suspension ; c) balance de précision pour la pesée des dépôts solides issus de la filtration.

En supposant le mélange « eau + MES » homogène après remise en suspension à l'issue du tamisage, alors la concentration dans le sous-échantillon de 500 ml est égale à la concentration dans l'eau de tamisage. Or, la concentration est un rapport entre masse et volume. Donc la masse de MES dans l'échantillon total peut se calculer selon l'Équation (8) qui suit :

$$M_{éch.} = \frac{m_{sous-éch.}}{V_{sous-éch.}} V_{tamisage} \quad (8)$$

où $M_{éch.}$ est la masse des MES dans l'échantillon total, $m_{sous-éch.}$ est la masse des MES dans le sous-échantillon liquide (connue après filtration et pesée), $V_{sous-éch.}$ est le volume du sous-échantillon liquide filtré et $V_{tamisage}$ est le volume d'eau utilisé sur le terrain pour le tamisage de l'échantillon.

II.3.3. Estimation des stocks locaux

Le calcul des stocks ponctuels pour la fraction sableuse s'effectue à l'aide des mesures de terrain et des masses obtenues après séchage. Ces données sont compilées sur un tableur afin d'être aisément utilisées.

Pour les échantillons prélevés en sub-surface selon la méthode de Deng *et al.* (2022), ou pour les échantillons prélevés selon la méthode de McNeil & Ahnell (1964) les stocks sont calculés selon l'Équation (1), en prenant la masse de la fraction de sables, à savoir $M_{[0.1-2]mm}$. La valeur obtenue est un stock volumique, en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Notons que dans le cas des « placettes » la surface vaut la surface délimitée par le cadre de 30 cm x 30 cm, tandis que dans le cas du « McNeil », la surface correspond à la section du cylindre de diamètre 14.5 cm.

Pour les échantillons prélevés en surface, comme proposé dans la littérature, le stock est un stock surfacique, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, et non volumique. L'équation utilisée est l'Équation (2), également avec $M_{[0.1-2]mm}$.

II.3.4. Représentation des données

Afin de faciliter l'analyse et l'interprétation des résultats granulométriques et des stocks locaux, plusieurs scripts sont écrits en langage de programmation *Python*. Chaque script permet de lire les données contenues dans un fichier au format .csv et de les représenter sous la forme d'un graphique à l'aide de la bibliothèque *matplotlib* (courbes cumulées ou diagrammes en boîte selon le script). Cet outil de production graphique permet notamment la superposition de plusieurs distributions granulométriques sur un unique graphique semi-logarithmique, et propose un large champ de personnalisation graphique (légende, axes...).

II.4. Modélisation hydro-sédimentaire 1-D et analyse spatiale

II.4.1. Modélisation hydro-sédimentaire 1-D du Rhône en amont de Lyon

La modélisation hydro-sédimentaire permet de simuler les contraintes exercées par l'écoulement sur le lit du Rhône, séparé en une multitude de biefs (Figure 15) présentant chacun des sections nommées selon leur point kilométrique (PK).

Dans notre cas la simulation est réalisée pour le pic de la crue de janvier 2018. Cela permet d'obtenir la contrainte exercée à ce moment précis, correspondant alors à la contrainte maximale de la crue sur les bancs. Il est ainsi possible de déterminer des épaisseurs d'érosion pour chaque section du modèle.

Les valeurs fournies par le modèle en sortie, à savoir la vitesse d'écoulement et le rayon hydraulique pour chaque section de chaque bief, permettent dans un premier temps de calculer la contrainte de

cisaillement au fond τ_f , à partir de la Loi de Manning-Strickler, et la contrainte de cisaillement efficace τ_{eff} (cf. Paragraphe 1.2.3., Équations (3) et (4)). Le coefficient de Strickler global K_S utilisé dans les calculs est celui ayant servi au calage du modèle.

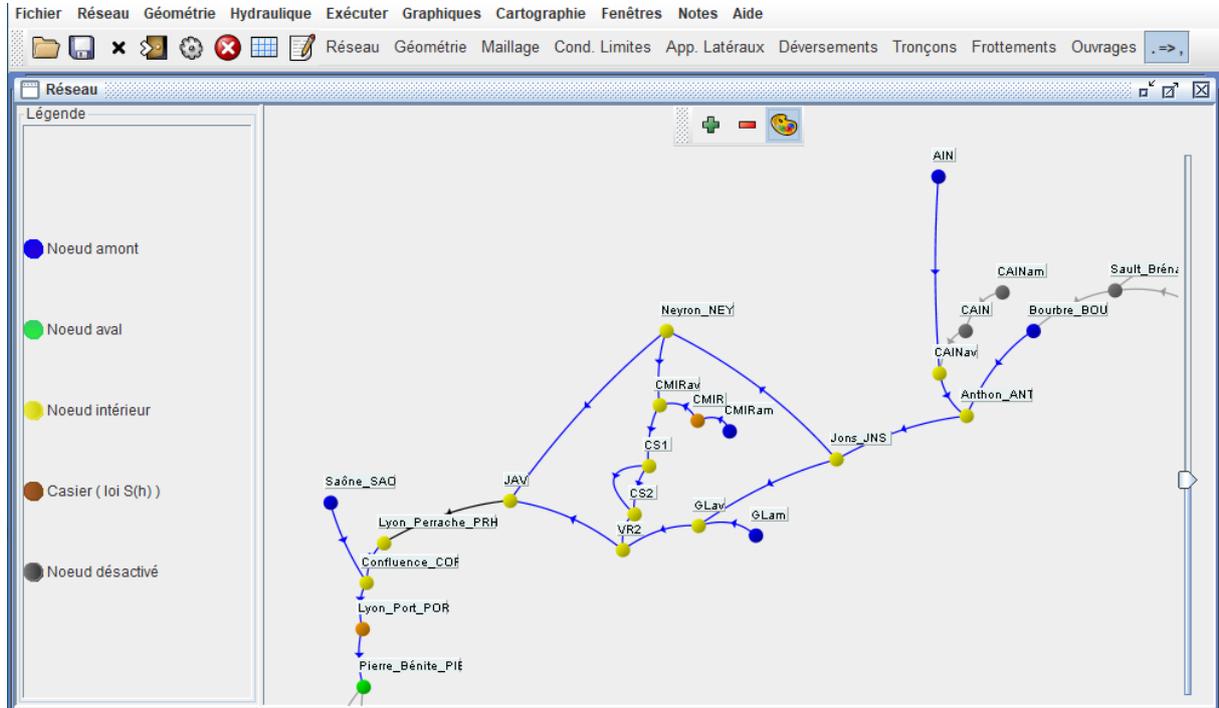


Figure 15 : Interface utilisateur PAMHYR affichant le réseau hydraulique du Rhône en amont de Lyon pour lequel ont été exécutés les codes de calcul.

II.4.2. Traitement SIG

L'ensemble des données GPS acquises sur le terrain sont traitées à l'aide du logiciel ArcGIS. La projection Lambert93 est utilisée dans la représentation cartographique, conformément au décret n°2000-1276 du 26 décembre 2000 qui en fait la projection officielle en France Métropolitaine, associée au système géodésique RGF93.

Les points GPS sont reliés afin de former des polygones représentant chaque banc et/ou zone homogène, et les surfaces de chacun sont calculées grâce à l'outil de calcul de géométrie du logiciel (Figure 16).

Ensuite, chaque polygone est localisé en fonction des sections du modèle hydro-sédimentaire qui le recoupe. Par exemple, le banc Mi09 est situé dans le bief 5 nommé « Miribel amont ». L'amont de la zone « banc armuré : galets moyens à fins » est comprises entre les sections de PK 23240 et 23200 ; l'aval est situé au PK 22900.

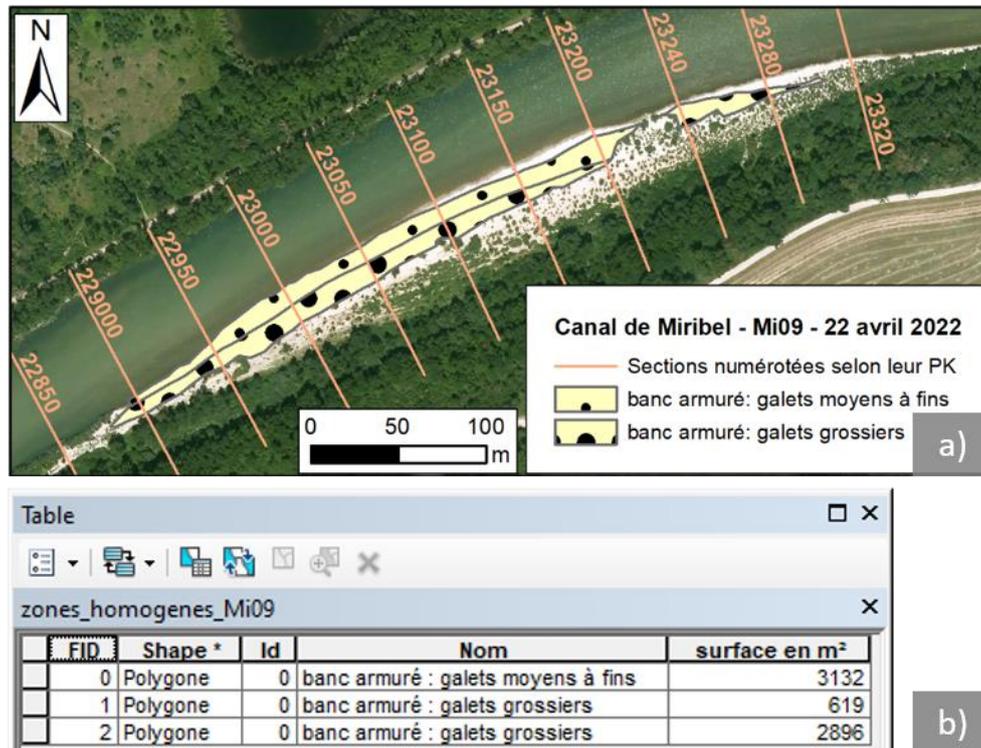


Figure 16: Traitement des données GPS sur le logiciel ArcGIS. a) Les polygones correspondent aux zones homogènes du banc Mi09 délimité le 22 avril 2022. Fond de carte : BD Ortho – IGN – juin 2020 ; b) interface d'ArcMap présentant les résultats de calcul de géométrie pour les trois polygones.

Dans le cas où un banc n'est pas prospecté, et donc qu'aucune acquisition de données GPS n'a été possible, alors une digitalisation du banc permet d'estimer sa surface. Il s'agit, à partir d'une image, de délimiter le contour du banc en utilisant un logiciel de traitement SIG, puis de calculer la surface du polygone obtenu. Ici, il est choisi d'utiliser une image Sentinel 2 – satellites de l'Agence spatiale européenne ESA – du 14 avril 2022 et de résolution 10 m. Il aurait été envisageable d'utiliser les photographies aériennes de la *BD Ortho* de l'IGN dont la résolution est plus fine (env. 20 cm). Néanmoins, les photographies les plus récentes mises à disposition ont été prises en 2021, voire 2020 selon le secteur. L'utilisation de l'image satellite datée aux alentours des campagnes de terrain a été privilégiée vis-à-vis de la très haute résolution. L'image satellite est choisie pour sa clarté et l'absence de nuages au dessus du secteur d'étude pour la date du 14 avril 2022.

II.4.3. Interpolation et extrapolation des données granulométriques

L'estimation des stocks de sable dans le secteur d'étude nécessite d'attribuer à chaque zone des caractéristiques granulométriques de surface (i.e. d_{50} , d_{90}) ainsi que des valeurs de stock en surface et en sub-surface.

Les méthodes précédemment présentées permettent l'estimation de stocks à une échelle très locale (< 0.5 m²). Une interpolation des données granulométriques est donc nécessaire au sein de chaque

zone homogène. L'étendue des zones et le temps à disposition pour réaliser les prélèvements contraignent le nombre possible d'échantillons et, de fait, la méthode d'interpolation. Pour chaque zone il est choisi de moyenniser les valeurs des stocks locaux de cette même zone.

Ensuite, en cas d'absence de données sur un banc, il est nécessaire d'extrapoler les données acquises sur les bancs prospectés, afin d'intégrer l'ensemble des bancs du secteur d'étude dans le calcul de stock total présenté par la suite (cf. Paragraphe II.4.4). Pour limiter au maximum les incertitudes dans les estimations, il semble pertinent de prendre en compte la variabilité de la granulométrie à l'échelle du tronçon dans l'extrapolation.

Il est donc choisi d'associer aux bancs non prospectés les valeurs du banc le plus proche, situé sur le même tronçon. La distinction entre surface et sub-surface est conservée.

II.4.4. Calcul de stocks totaux

Les contraintes et paramètre de Shields calculés à l'issue de la modélisation de la crue de janvier 2018 permettent le calcul de l'épaisseur d'érosion δ_b du lit du Rhône en chaque section du secteur d'étude en utilisant l'Équation (7) présentée au Paragraphe I.2.3.

Ainsi, en connaissant l'aire de chaque zone homogène, leur stock moyen de sable en surface et sub-surface, ainsi que l'érosion moyenne sur chacune – pour un événement donné – il est possible d'estimer la quantité de sables mobilisable, ou stock total, en appliquant l'Équation (9) :

$$St\ total = \sum_{i=0}^{n_{ZH}} (\overline{S_{ts,i}} \times A_i + \overline{S_{tb,i}} \times A_i \times \delta_{b,i}) \quad (9)$$

où n_{ZH} est le nombre de zones homogènes, $\overline{S_{t,i}}$ est la moyenne des stocks ponctuels de la zone homogène en question (n° i), A_i est l'aire de la zone homogène n°i et $\delta_{b,i}$ l'épaisseur d'érosion moyenne dans la zone homogène n°i.

Ensuite, il sera envisageable de comparer le stock massique total de sable mobilisé avec le flux de 0.175 Mt mesuré par G. Dramais (2020).

III. Evaluation des stocks de sables dans le Rhône en amont de Lyon

Les données brutes issues des échantillons prélevés lors des campagnes de terrain permettent progressivement, après traitement, d'amener à des résultats, notamment la granulométrie des bancs et les stocks locaux. Ensuite, leur analyse permet d'envisager de nouveaux résultats, à savoir, les estimations de stocks de sables mobilisables lors d'un événement hydrologique donné.

III.1. Etude préliminaire

Afin de comprendre et d'interpréter les résultats obtenus, il convient au préalable de présenter l'état de la prospection, d'envisager les sources potentielles d'erreur et de conforter les méthodes utilisées.

III.1.1. Etat des prospections

Un total de 12 campagnes de terrain a pu être mené entre les mois de mars et juin, permettant le prélèvement de 120 échantillons. Néanmoins, cela ne représente pas l'intégralité des bancs du secteur d'étude repérés à partir de photographies aériennes et images satellites. Le choix des bancs à prospecter s'est fait selon le temps disponible, la taille des bancs et la facilité d'accès (Annexe 3 et Annexe 4). Il est à noter que le banc A01 situé à la confluence directe entre l'Ain et le Rhône était difficilement accessible avec le matériel de terrain. Il a donc été choisi de prospecter le banc A02 en supposant que les deux bancs étaient relativement similaires. Une prospection à pieds a également été réalisée pour observer le banc A01.

La surface des bancs non prospectés a été estimée selon la méthode par digitalisation présentée au Paragraphe II.4.2. La surface des bancs prospectés a également été estimée et est comparée à la surface obtenue à partir des données de géo-positionnement (Figure 17). Le coefficient de détermination R^2 de la régression linéaire est de l'ordre de 0.97, traduisant une forte corrélation entre les valeurs obtenues selon les deux méthodes de détermination de surfaces. Cela conforte l'utilisation de la digitalisation pour définir la surface de chaque banc non prospecté. Néanmoins, il est important de noter que les délimitations au GPS ont été réalisées à des dates différentes, et donc que la hauteur d'eau du Rhône et de l'Ain ont fluctué avec le débit. Les débits correspondant aux dates de campagnes sont fournis en Annexe 5.

La surface totale de bancs qui sont émergés à l'étiage et pas, ou peu, végétalisés a été estimée en cumulant les surfaces de l'ensemble des bancs. Cette surface totale est de l'ordre de 240 000 m². Ainsi, les bancs prospectés couvrent une surface de près de 80 % de la surface totale de bancs dans

le secteur d'étude (Annexe 3 et Annexe 4). On peut de fait supposer que l'extrapolation des données aura un impact limité sur les résultats finaux puisqu'une grande partie du secteur d'étude a été prospectée.

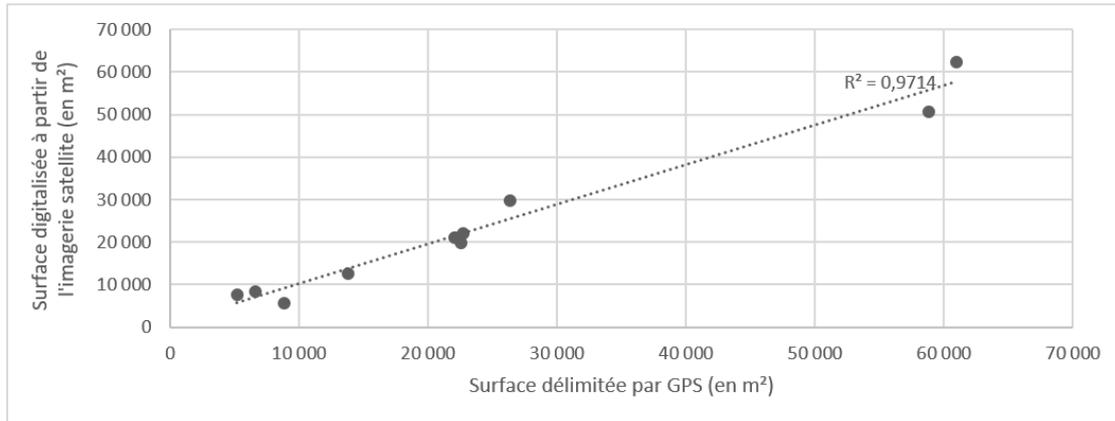


Figure 17 : Comparaison des surfaces de bancs obtenues selon deux méthodes : délimitation sur le terrain à l'aide d'un capteur GPS et délimitation à partir d'une image satellite à résolution 10 m.

III.1.2. Estimation de l'erreur sur le tamisage

Comme tous résultats scientifiques, les masses des fractions granulométriques de chaque échantillon sont à relativiser au droit des incertitudes sur les mesures préalables.

Afin d'estimer l'erreur sur le tamisage de terrain, en particulier sur la fraction sableuse, une partie des échantillons est soumise à un tamisage supplémentaire. Dans un premier temps seule la fraction granulométrique [0,5 - 2] mm, de masse $M_{0,5-2 \text{ mm}}$ connue, est tamisée à l'aide d'une tamiseuse de laboratoire *Retsch AS 200*. Les échantillons sont tamisés à sec durant 3 minutes, avec une vibration d'amplitude 60 et en mode « intervalle ON », sur une colonne constituée d'un tamis à 500 μm et d'un tamis à 63 μm (à défaut de tamis de laboratoire de 100 μm). Les paramétrages sont définis de manière empirique afin d'optimiser le temps de manipulation.

Le *refus* et le *passant* du tamisage au laboratoire, respectivement les fractions granulométriques supérieure et inférieure à 500 μm , sont pesés et la masse du *refus* est alors considérée comme étant la masse exacte ($M_{E,0,5-2 \text{ mm}}$) de la fraction [0,5 - 2] mm pour l'échantillon analysé. Pour la fraction [100 - 500] μm on additionne la masse du *passant* à celle pesée après tamisage de terrain ($M_{100-500 \mu\text{m}}$) afin d'obtenir ce qui est considéré comme la masse exacte $M_{E,100-500 \mu\text{m}}$ de cette fraction (Équation (10)).

$$M_{0,5-2 \text{ mm}} = M_{E,0,5-2 \text{ mm}} + M_{\text{passant } 500 \mu\text{m}} \quad (10)$$

Soit :

$$M_{E,0,5-2 \text{ mm}} = M_{0,5-2 \text{ mm}} - M_{\text{passant } 500 \mu\text{m}}$$

L'*erreur absolue* est définie comme la différence entre la masse M , mesurée après le tamisage de terrain, et la masse M_E , après re-tamisage au laboratoire et considérée comme la masse exacte. L'*erreur relative*, notée ε_r , correspond ensuite au quotient de l'erreur absolue à la masse exacte M_E . On multiplie par 100 pour l'exprimer en % (Équation (11)).

$$\varepsilon_r\% = \frac{M - M_E}{M_E} \cdot 100 \quad (11)$$

Ce calcul est réalisé pour les deux classes granulométriques associées aux sables ([0,5 - 2] mm et [100 - 500] μm), pour un panel de 10 échantillons prélevés lors de la campagne sur l'Ain et 1 échantillon sur le canal de Miribel (Rhône).

Dans un second temps, un tamisage supplémentaire est réalisé sur la fraction sableuse totale [0.1 - 2] mm, avec les masses $M_{100-500 \mu\text{m}}$ et $M_{0,5-2 \text{ mm}}$ connues puisqu'il s'agit de celles obtenues après tamisage de terrain. Les paramétrages choisis diffèrent de ceux précédemment appliqués avec, ici, un tamisage par lavage durant 15 minutes, une amplitude de 50 et le mode « intervalle ON », pour une colonne constituée de tamis à 500 μm et 100 μm . Ce tamisage supplémentaire est réalisé afin de comparer les incertitudes obtenues par les méthodes de tamisage à sec et de tamisage par lavage au laboratoire, et également d'estimer l'incertitude relative sur le tamisage de terrain pour la fraction inférieure à 100 μm . Les deux fractions sableuses sont mélangées avant tamisage. La masse tamisée vaut alors l'addition des masses $M_{100-500 \mu\text{m}}$ et $M_{0,5-2 \text{ mm}}$. Ensuite, la phase de tamisage est suivie d'une phase de séchage avant d'effectuer la pesée des refus à 500 et 100 μm , qui correspondent aux masses exactes $M_{E,0,5-2 \text{ mm}}$ et $M_{E,100-500 \mu\text{m}}$. Le passant inférieur à 100 μm est évacué avec l'eau de tamisage. Sa récupération aurait nécessité une multitude de manipulations chronophages. Il est alors considéré que sa masse, notée $M_{<100 \mu\text{m}}$, vaut la somme des masses initiales à laquelle on soustrait la masse des refus des deux tamis (Équation (12)).

$$M_{<100 \mu\text{m}} = (M_{100-500 \mu\text{m}} + M_{0,5-2 \text{ mm}}) - (M_{E,100-500 \mu\text{m}} + M_{E,0,5-2 \text{ mm}}) \quad (12)$$

Les graphiques ci-dessous (Figure 18 a et b) montrent une variabilité plutôt importante de l'erreur relative, pour les deux fractions considérées. L'asymétrie des boîtes illustre que l'erreur relative est, la plupart de temps, plutôt faible, mais qu'il arrive qu'elle soit bien plus élevée. L'un des échantillons présente une erreur relative de 253 % par la méthode de tamisage à sec, et de près de 235 % par la méthode de tamisage par lavage. Il n'est cependant ni représenté, ni considéré par la suite car son « mauvais tamisage » avait été clairement défini sur le terrain pour manque de temps en fin de journée. Il n'est donc pas représentatif de la qualité du tamisage sur le terrain.

L'erreur relative moyenne est symbolisée par une croix sur les graphiques (a) et (b). Pour la fraction [0,5 - 2] mm, sa valeur est de près de 20 % pour les deux tamisages. L'erreur moyenne pour la fraction [100 - 500] μm est de l'ordre de 14 % en Figure 18 (a) et de 9 % en (b). Pour finir, celle pour la fraction inférieure à 100 μm est de près de 16 %. Ces résultats sont plus élevés que ce qui avait été calculé sur les manipulations dans l'Arc-Isère (Deng, 2022) ; l'erreur reste toutefois raisonnable pour la discussion de nos résultats.

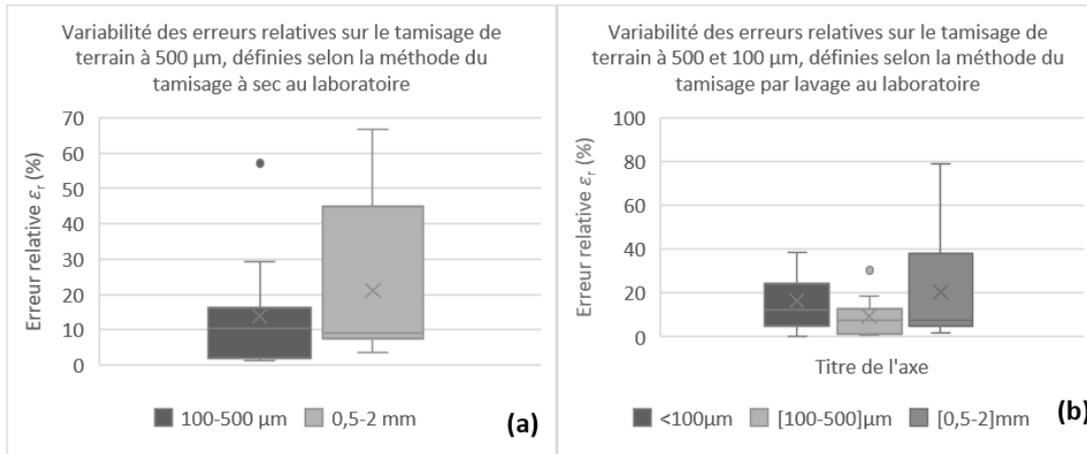


Figure 18 : Variabilité des erreurs relatives sur le tamisage de terrain selon deux méthodes : (a) tamisage à sec, (b) tamisage par lavage. L'effectif dans chaque boîte est de 11.

L'erreur sur les masses des classes granulométriques de chaque échantillon induit un biais sur ses caractéristiques granulométriques. La Figure 19 présente l'erreur relative sur ces caractéristiques après application, sur les masses, des erreurs moyennes obtenues par la méthode du tamisage par lavage au laboratoire. Sur le total des 120 échantillons, le diamètre médian d_{50} ainsi que le diamètre représentatif des grossiers (d_{84}) varient peu et ne sont donc pas impactés par cette erreur sur les classes les plus fines. Le d_{16} varie plus, et les données présentent une asymétrie, avec des valeurs jusqu'à près de 25 % d'erreur relative alors que la médiane est de l'ordre de 2 %. Encore une fois, cette erreur reste raisonnable pour la discussion des résultats. Quelques échantillons présentent néanmoins des valeurs aberrantes qui se situent graphiquement au-delà des extrémités, et sont représentées par des marqueurs circulaires.

Pour les classes granulométriques pesées directement sur le terrain (> 2 mm), on considère une incertitude de l'ordre de 10 %, sachant que le tamisage est plus aisé que pour les fractions fines.

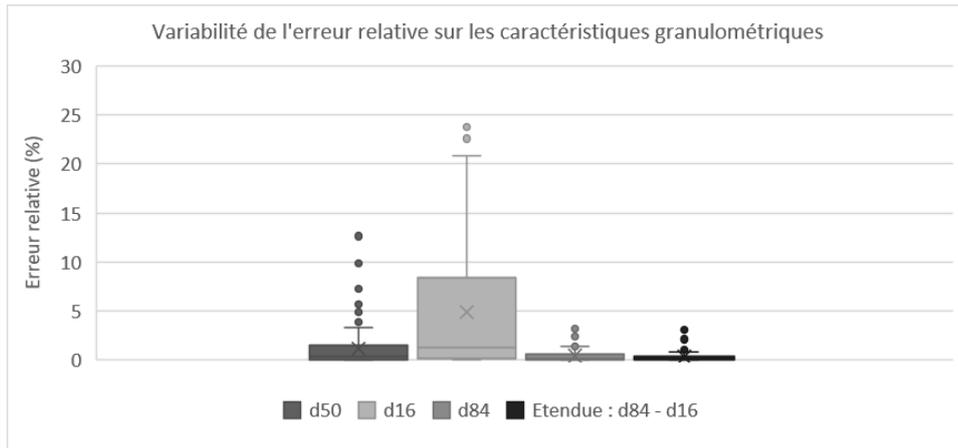


Figure 19: Variabilité de l'erreur relative sur les caractéristiques granulométriques des échantillons prélevés. d_{50} est le diamètre médian, d_{16} et d_{84} sont respectivement les diamètres atteints par 16 et 84 % de l'échantillon. L'effectif dans chaque boîte est de 120.

III.1.3. Comparaison des méthodes de prélèvements

Comme présenté dans le Paragraphe II.2., deux méthodes de prélèvement ont été utilisées sur le terrain :

- Méthode « des placettes », issue des travaux menés par Deng *et al.* (2022) : consiste à prélever un échantillon, de superficie limitée par un cadre en bois, en distinguant les couches de surface et de sub-surface ;
- Méthode « McNeil » (McNeil & Ahnell, 1964) : consiste à prélever un échantillon à l'aide d'un cylindre en acier pour obtenir un volume connu de sédiments, sans distinction entre surface et sub-surface.

Afin de comparer ces deux méthodes, quelques prélèvements des deux types ont été réalisés à proximité l'un de l'autre, plus ou moins proches selon les possibilités, lors des campagnes de terrain. Pour envisager une comparaison des valeurs obtenues par chacune des deux méthodes, les données granulométriques de surface et sub-surface obtenues pour les « placettes » sont additionnées.

Par la suite, dans les graphiques, les échantillons sont nommés de la manière suivante : *Nom du banc - Méthode Numéro de l'échantillon*. L'abréviation M correspond à la méthode « McNeil » appliquée dans l'eau et MT hors de l'eau (« terrestre »). P correspond à la méthode de Deng (« placette »). Par exemple, l'échantillon VR01-M1 a été prélevé sur le banc VR01, selon la méthode « McNeil », dans l'eau.

La Figure 20 présente sous la forme de courbes granulométriques cumulatives les résultats obtenus en amont du banc VR01 (Vieux Rhône). Les quatre prélèvements ont été réalisés sur une surface d'environ 10 m² ; ils sont donc proches les uns des autres (distance maximale de 5 mètres). Deux d'entre eux, M1 et M2 sont prélevés dans l'eau. On remarque qu'ils sont relativement identiques et que leur granulométrie est plus grossière que la moyenne des quatre échantillons, avec d_{16} proche de 10mm tandis que la moyenne vaut près de 5 mm. MT1 et P1, prélevés hors de l'eau, ne sont pas tout à fait semblables, bien que leur allure soit proche. Notamment, la classe 2-10 mm est plus représentée chez MT1 que chez P1. Concernant les pourcentages de particules inférieures à 2 mm prélevées dans chacun des cas, les incertitudes sur le tamisage de terrain ne permettent pas d'être certain d'observer des différences entre les deux méthodes. Il a néanmoins été observé sur le terrain que, si les particules en surface sont grossières (i.e. galets), la méthode de prélèvement McNeil dans l'eau entraîne une perte en particules fines lors de la mise en place du cylindre. Il semble cependant difficile de déterminer quelles classes granulométriques sont alors sous-estimées, et de combien est la perte. De plus, des différences entre les prélèvements dans et hors eau pourraient être expliquées par une mobilisation aisée des particules les plus fines dans le chenal principal produisant un certain armurage tandis que celles hors eau ne sont pas mobilisées.

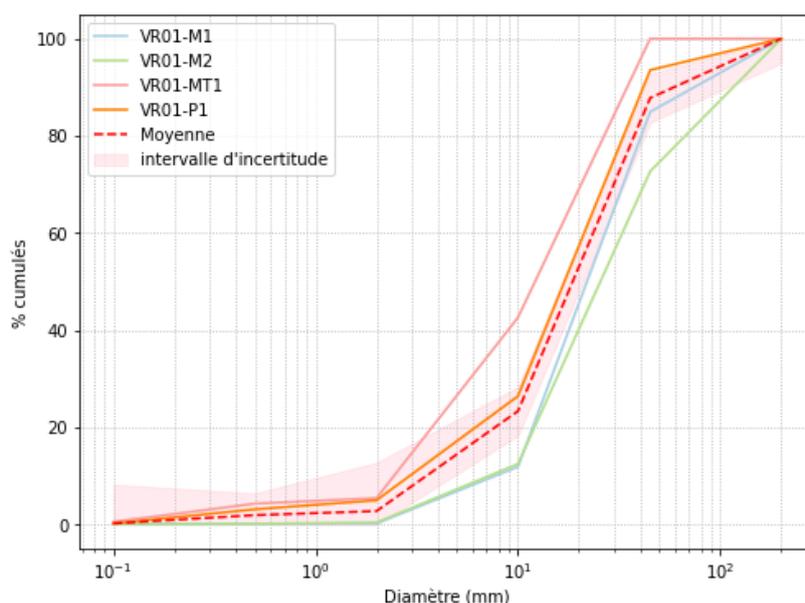


Figure 20: Courbes granulométriques cumulatives de plusieurs échantillons prélevés selon les méthodes « placettes » et « McNeil » à proximité les uns des autres, sur le banc VR01 du Vieux Rhône. Les échantillons sont nommés *Nom du banc – Méthode Numéro de l'échantillon*. L'abréviation M correspond à la méthode « McNeil » appliquée dans l'eau et MT hors de l'eau (« terrestre »). P correspond à la méthode de Deng (« placette »).

La Figure 21 présente les résultats obtenus sur le banc Mi03 (Canal de Miribel). Les prélèvements sont cette fois encore réalisés sur une surface de l'ordre de 10 m², avec cependant P1 et M2 espacés de près de 8 mètres. MT1 est prélevé juste à la limite de la ligne d'eau. M1, M2 et MT1 présentent des résultats identiques. La granulométrie de P1, est plus fine que les autres échantillons, avec

notamment un d_{16} de l'ordre de 2 mm tandis que celui des autres vaut environ 10 mm, soit 5 fois plus élevé ; d_{50} vaut environ 15 mm soit près de 2 fois moins que pour les autres échantillons ; d_{84} vaut 40 mm soit 5 fois moins que celui de M1, M2 et MT1. Dans ce cas précis, l'hypothèse que les différences sont dues à une perte des particules fines lors de la mise en place du cylindre semble aberrante puisque le prélèvement « McNeil terrestre », MT1, présente des résultats similaires aux résultats obtenus dans l'eau. Ainsi, l'hypothèse la plus probable est que le banc est peu souvent immergé et donc que les sables ne sont pas mobilisés au niveau de P1 tandis qu'ils le sont aux niveaux de M1, M2 et MT1.

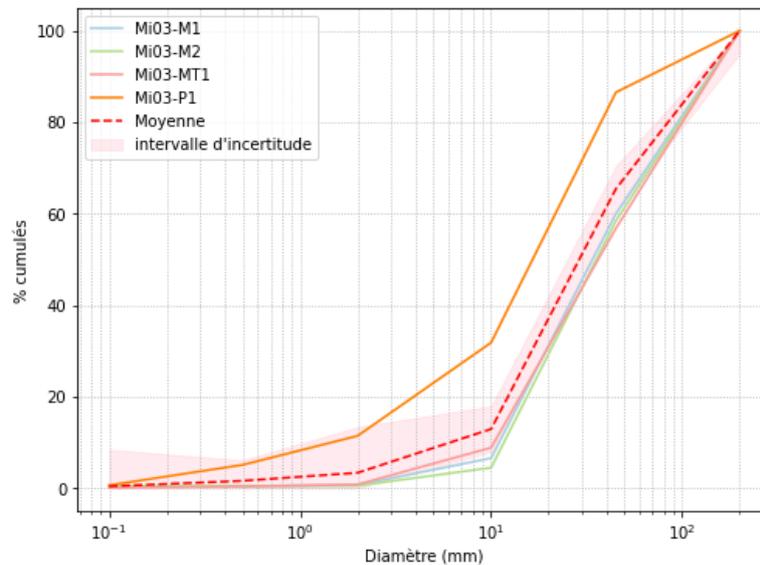


Figure 21: Courbes granulométriques cumulatives de plusieurs échantillons prélevés selon les méthodes des « placettes » et « McNeil » à proximité les uns des autres, sur le banc Mi03 du canal de Miribel. Les échantillons sont nommés *Nom du banc – méthode et numéro de l'échantillon*. L'abréviation M correspond à la méthode « McNeil » appliquée dans l'eau et MT hors de l'eau (« terrestre »). P correspond à la méthode de Deng (« placette »).

La Figure 22 présente les résultats obtenus sur le banc Mi11 (Canal de Miribel). Le cas particulier de ce secteur est que la campagne de terrain a eu lieu en même temps qu'un lâcher du barrage de Jons par EDF, engendrant une élévation temporaire du niveau de l'eau. Il a ainsi été possible de réaliser un prélèvement dans l'eau en un point, puis hors eau à moins d'un mètre une fois la hauteur d'eau rabaissée. Les courbes granulométriques correspondant aux deux échantillons sont particulièrement similaires, aux incertitudes près. Les deux méthodes ont donc donné, ici, des résultats semblables, ce qui rassure sur la fiabilité des deux méthodes, utilisées conjointement. On remarque néanmoins que, dans ce secteur, les particules les plus grossières ne dépassent pas les 45 mm, limitant les perturbations lors de la mise en place du cylindre.

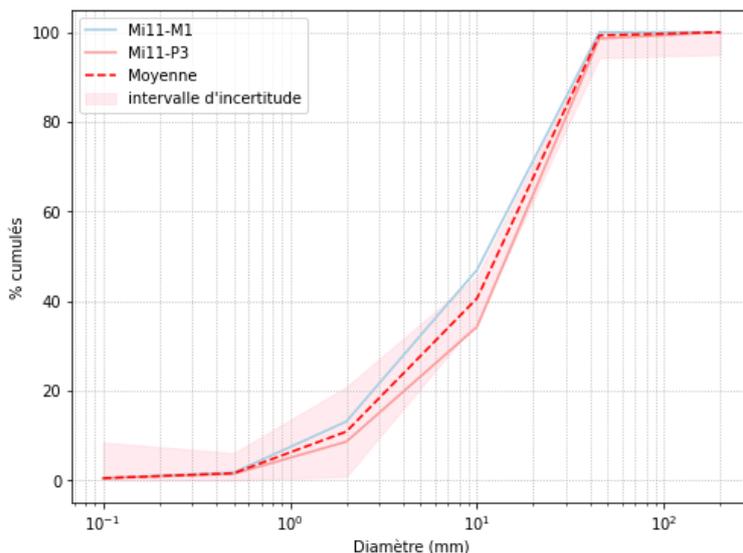


Figure 22 : Courbes granulométriques cumulatives de plusieurs échantillons prélevés selon les méthodes des « placettes » et « McNeil » à proximité les uns des autres, sur le banc Mi11 du canal de Miribel. Les échantillons sont nommés *Nom du banc – méthode et numéro de l'échantillon*. L'abréviation M correspond à la méthode « McNeil » appliquée dans l'eau et P correspond à la méthode de Deng (« placette »).

III.2. Granulométrie des bancs de la zone d'étude

Déterminer la granulométrie d'un échantillon est une manière de le caractériser, afin, ensuite, de le comparer à ses voisins, de réaliser des interpolations à l'échelle d'une zone, puis, finalement, d'extrapoler les valeurs obtenues aux zones non prospectées.

Les résultats obtenus selon la méthode « McNeil » en banc émergé (hors eau) ne sont pas pris en compte dans la suite. En effet, le nombre de prélèvements réalisés est faible au regard de l'ensemble des échantillonnages de type « placette » et cette méthode ne tient pas compte de la distinction entre surface et sub-surface. Les données ont néanmoins contribué à la validation de la méthode « McNeil » en banc immergé (cf. Paragraphe III.1. 3.).

III.2.1. Analyse granulométrique générale

La définition des incertitudes sur le tamisage et la comparaison des méthodes (cf. Paragraphe III.1) permettent désormais l'analyse de la granulométrie des bancs, au travers de chacun des échantillons.

L'objectif de l'analyse granulométrique est de déterminer si les zones jugées sur le terrain comme étant homogènes peuvent réellement être considérées comme telles, auquel cas l'interpolation des caractéristiques granulométriques locales est envisageable, ainsi que celle des stocks de sables.

Les données sont représentées sous la forme de courbes granulométriques (Figure 23), sur des graphiques différents selon l'emplacement du banc et selon la couche d'intérêt – (surface, S, ou sub-surface, B, prélevées selon la méthode des « placettes » (Deng et al., 2022) ; sans distinction, M, pour le prélèvement selon la méthode « McNeil » (McNeil & Ahnell, 1964)). La moyenne de chaque zone est ajoutée sur les graphiques, ainsi que la variabilité autour de la moyenne, définie selon les incertitudes sur le tamisage (cf. Paragraphe III.1.2.). Le diamètre, en mm, correspond au diamètre passant. Les notations des échantillons sont telles que « VR01-2B » et « VR01-2S » font référence à l'échantillon localisé au point de la placette « VR01-P02 » (cf. Annexe 3 et Annexe 4).

De manière très générale, sur l'ensemble des graphiques, les courbes moyennes ont une allure très proche, avec un d_{50} autour de 20 mm, et un d_{84} autour de 45-60 mm. d_{16} est plus variable.

Secteur « Ain » :

La granulométrie de surface des échantillons prélevés sur le banc A02 de l'Ain est plus disparate que dans les autres secteurs. A-2S, 3S, 4S, tous les trois en aval du banc, présentent des d_{16} et d_{50} relativement similaires les uns par rapport aux autres, mais pour A-3S le d_{84} est légèrement plus fin. Il s'agit de l'échantillon prélevé sur la nappe de charriage. A-6S, 7S, 8S, 9S présentent également une granulométrie proche, avec néanmoins une étendue granulométrique plus importante pour A-6S et 8S. A-1S, 5S, 10S sont globalement dans la moyenne. Ces trois échantillons ont été prélevés en haut de banc.

Les échantillons A-DEP 1 et A-DEP 2 sont des dépôts de sables que nous avons prélevés en haut de banc, sans réelle distinction entre surface et sub-surface. Le premier présente une granulométrie plus grossière que le second, qui présentait une quantité importante de graviers en sub-surface.

En sub-surface, les échantillons se ressemblent plus qu'en surface.

Les quatre échantillons prélevés, dans l'eau, selon la méthode « McNeil » présentent également une granulométrie proche de la moyenne.

Secteur « Canal de Miribel et Seuil de Villeurbanne » :

Les données pour ce secteur sont séparées en deux graphiques pour chaque type (surface, sub-surface, McNeil) afin d'être plus lisibles. Il est également choisi de rassembler les données obtenues sur le Seuil de Villeurbanne avec celle du Canal de Miribel afin d'avoir une référence de comparaison, le nombre de prélèvements au Seuil de Villeurbanne étant restreint. La courbe « Moyenne »

correspond à la moyenne de l'ensemble des données d'un même type du secteur « Canal de Miribel et Seuil de Villeurbanne » (i.e. de SV-1S à Mi11-5S pour les échantillons de surface).

Les échantillons prélevés sur un même banc semblent d'autant plus différents les uns des autres qu'ils sont espacés, traduisant la variabilité spatiale, que ce soit en surface ou en sub-surface. De plus, on observe l'effet de l'armurage en surface, avec une granulométrie sensiblement plus grossière qu'en sub-surface.

Sur le banc Mi11, le d_{50} diminue à mesure qu'on s'approche de l'aval, passant, en surface, de 37 à 16 mm, et, en sub-surface, de 30 à 12 mm. La même observation est possible sur le banc Mi05, avec un d_{50} variant entre 24 et 19 mm en surface et entre 19 et 13 mm en sub-surface.

Sur le banc Mi09 on observe des différences entre le haut de banc – échantillons Mi09-2S et 6S – et le bas de banc – échantillons Mi09-3S, 4S et 5S. En surface, la granulométrie en haut de banc est très grossière, tandis qu'en sub-surface on y retrouve des sables en quantité non négligeable (d_{16} de l'ordre de 1 mm). A l'inverse, en bas de banc la granulométrie est plus fine en surface qu'en sub-surface. L'échantillon MI09-1S se rapproche granulométriquement des échantillons de haut de banc pour la surface, mais des autres en sub-surface.

Au seuil de Villeurbanne, les échantillons se ressemblent, avec néanmoins, en sub-surface, une granulométrie plus fine en amont qu'en aval.

La plupart des échantillons prélevés selon la méthode « McNeil » ont une granulométrie relativement similaire. Mi03-M1 et M2, localisés les uns à côté des autres, sont identiques et plus grossiers que les autres échantillons. L'échantillon Mi11-M1 se distingue aussi par une granulométrie plus fine. Rappelons, comme vu précédemment au Paragraphe III.1.2. que cet échantillon a été prélevé dans l'eau, mais lors d'un lâcher du barrage de Jons qui a entraîné sur quelques heures la montée du niveau de l'eau. Sa localisation est, à quelques centimètres près, la même que Mi11-3S et 3B.

Secteur « Vieux-Rhône » :

Les placettes d'échantillonnage VR01-P01, P02, et P07, localisées en amont et milieu du banc armuré, et VR01-P03, P04 et P05 localisées dans le chenal secondaire, présentent une granulométrie relativement similaire avec en surface d_{50} de l'ordre de 14-15mm ainsi que d_{16} et d_{84} proches entre chaque échantillon. En sub-surface, les courbes sont également semblables pour ces échantillons, avec néanmoins VR01-3B, 4B et 5B dont le d_{50} est légèrement plus fin. Les échantillons VR01-6S,

VR02-1S et 2S, situés respectivement en aval du banc VR01 et en amont du banc VR02, sont granulométriquement semblables, avec un d_{50} de l'ordre de 22 mm.

Enfin, VR02-3S, prélevé en milieu et haut de banc - surélévation de près de 3 mètres par rapport au niveau de l'eau - présente un d_{16} plus fin que pour les six autres (env. 400 μm contre 2 mm). Cela peut s'expliquer par la faible fréquence de hauteurs d'eau pouvant mobiliser les sables déposés en haut de banc. Comme discuté par Bravard et al. (2014), il existe un tri granulométrique vertical sur une section d'une rivière avec une présence de sable plus prononcée sur le haut des bancs.

Concernant les échantillons prélevés selon la méthode « McNeil », VR02-M1 et M2 présentent un d_{16} respectivement de 500 μm et 1 mm, ce qui est significativement inférieur à la valeur moyenne (env. 5mm). Les échantillons de cette zone sont donc plus représentés par les fractions sableuses que les autres échantillons prélevés dans l'eau. On suppose que cela est dû au faible gradient hydraulique dans ce secteur, favorisant le dépôt de sédiments fins. De plus, de l'érosion de berge a été observée ici, pouvant expliquer la présence de sables en quantité.

Finalement, la représentation des données sous la forme de courbes granulométriques cumulatives rend compte des différences, plus ou moins marquées, entre les échantillons prélevés dans les trois secteurs. Néanmoins, les graphiques traduisent également des similitudes qui peuvent amener à valider la délimitation en zones « homogènes ».

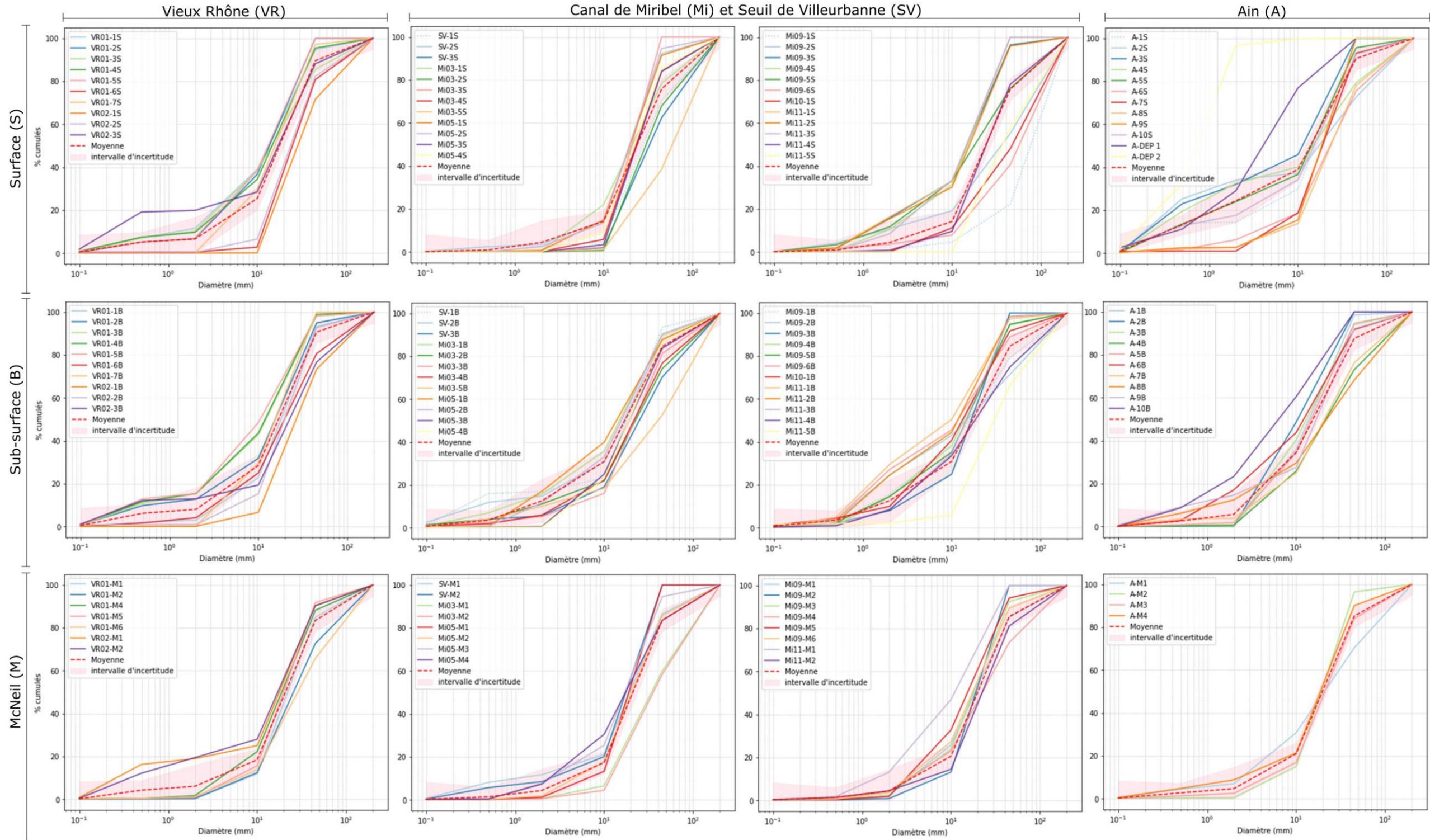


Figure 23 : Courbes granulométriques cumulatives des échantillons prélevés dans quatre secteurs : Vieux-Rhône, Canal de Miribel, Seuil de Villeurbanne, Confluence Ain-Rhône. Les échantillons sont séparés selon le secteur ainsi que selon le type, à savoir, échantillon de surface ou de sub-surface prélevé selon la méthode des placettes (Deng et al., 2022), ou échantillon total prélevé selon la méthode « McNeil » (McNeil and Ahnell, 1964).

III.2.2. Analyse des classes granulométriques inférieures à 2mm

En Figure 23, la représentation des données permet d'avoir une vision assez globale de la granulométrie sur le tronçon d'étude, mais les variations dans la fraction sableuse sont masquées par la quantité de particules plus grossières alors qu'il s'agit du cœur de notre étude. Il apparaît donc important de représenter les données de sorte à mettre en avant les classes granulométriques inférieures à 2 mm. Ainsi, en Figure 24, les pourcentages des trois classes, à savoir « <100 μm », « [100-500] μm » et « [0.5-2] mm », sont représentés sous la forme de diagrammes en boîtes. Les valeurs médianes apparaissent en orange.

On remarque, pour chacun des graphiques, que la quantité de particules inférieures à 100 μm est faible. Les valeurs ne dépassent pas les 3 % de la masse totale. Néanmoins, il est à noter que pour certains échantillons, ce faible pourcentage constitue finalement la majorité de la fraction inférieure à 2mm. En moyenne la fraction des fines (<100 μm) représente près de 20 % des particules inférieures à 2mm, mais les valeurs peuvent atteindre jusqu'à 97 %. La valeur médiane est cependant proche de 7 %.

Ain :

Les quantités de sables dans les échantillons prélevés sur l'Ain semblent plus importantes que dans les deux autres secteurs puisque les valeurs médianes valent respectivement 12 et 5 % pour les deux classes de sable ([100-500] μm et [0.5-2] mm). La classe la plus représentée est la classe des sables fins.

En eau la quantité de prélèvements réalisés est faible pour réellement observer une tendance, mais globalement les quantités de sable sont faibles (< 5 %).

Deux dépôts de surface ont également été prélevés sur l'Ain. Ce type de diagramme n'est pas adapté à la représentation de si peu de données puisque finalement chaque échantillon se situe aux extrémités des « moustaches » du diagramme. Néanmoins, cela permet de représenter l'ensemble des données de manière homogène. Les deux dépôts sont très différents, puisque l'un est constitué quasi exclusivement de sables, et principalement des sables grossiers, tandis que l'autre est également constitué d'une grande partie de graviers (qui n'apparaissent donc pas sur ces graphiques puisque leur diamètre est supérieur à 2 mm).

Canal de Miribel :

Dans le secteur du canal de Miribel, la classe sableuse majoritaire est globalement la classe la plus grossière ([0.5-2] mm). En surface une nette asymétrie apparaît avec une valeur médiane proche de 1 % tandis que les valeurs atteignent près de 15 % de sables grossiers pour certains échantillons. Cette asymétrie traduit la variabilité spatiale de la granulométrie à l'échelle d'un tronçon, ici le Canal de Miribel.

Concernant les échantillons immergés, ils présentent très peu de particules de diamètre inférieur à 500 μm . Ensuite, la boîte associée à la fraction des sables grossiers ([0.5-2] mm) est encore asymétrique. Il semble important de noter que l'échantillon dont le pourcentage vaut près de 12 % est l'échantillon prélevé dans l'eau, mais lors d'un lâcher du barrage de Jons qui a entraîné sur quelques heures la montée du niveau de l'eau.

Vieux Rhône :

Les échantillons émergés prélevés sur le Vieux-Rhône, en surface et sub-surface, présentent principalement des sables fins ([100-500] μm). Pour les échantillons immergés, prélevés au McNeil, on observe une asymétrie dans cette classe sableuse, avec une valeur médiane quasi nulle, et des points allant jusqu'à 15% de sables fins dans l'un des échantillons. Si l'on regarde précisément les données on remarque que les échantillons les plus riches en sables fins sont localisés les plus en aval, à proximité d'un dépôt de sable. Il s'agit des échantillons remarqués précédemment (*cf.* III.2.1.a) dans la zone de faible gradient hydraulique.

Les pourcentages médians de sables prélevés sur les bancs du Vieux Rhône sont les mêmes en surface et sub-surface : 5 % pour la fraction [100-500] μm et 1-2 % pour la fraction [0.5-2] mm.

Seuil de Villeurbanne :

Le seuil de Villeurbanne compte peu d'échantillons par rapport aux autres secteurs, mais il semblait néanmoins important de le séparer du Canal de Miribel dans cette partie afin d'observer que les proportions des trois fractions diffèrent. En effet, ici la fraction majoritaire n'est pas la fraction [0.5-2] mm mais la fraction de sables fins, [100-500] μm . De plus, les sables et fines des échantillons semblent principalement localisés en sub-surface. En surface, les valeurs médianes sont inférieures à 5 % pour les trois fractions.

Dans l'eau, les quantités de sables prélevées sont de l'ordre de 5 % pour la fraction [100-500] μm et de l'ordre de 3 % pour la fraction [0.5-2] mm.

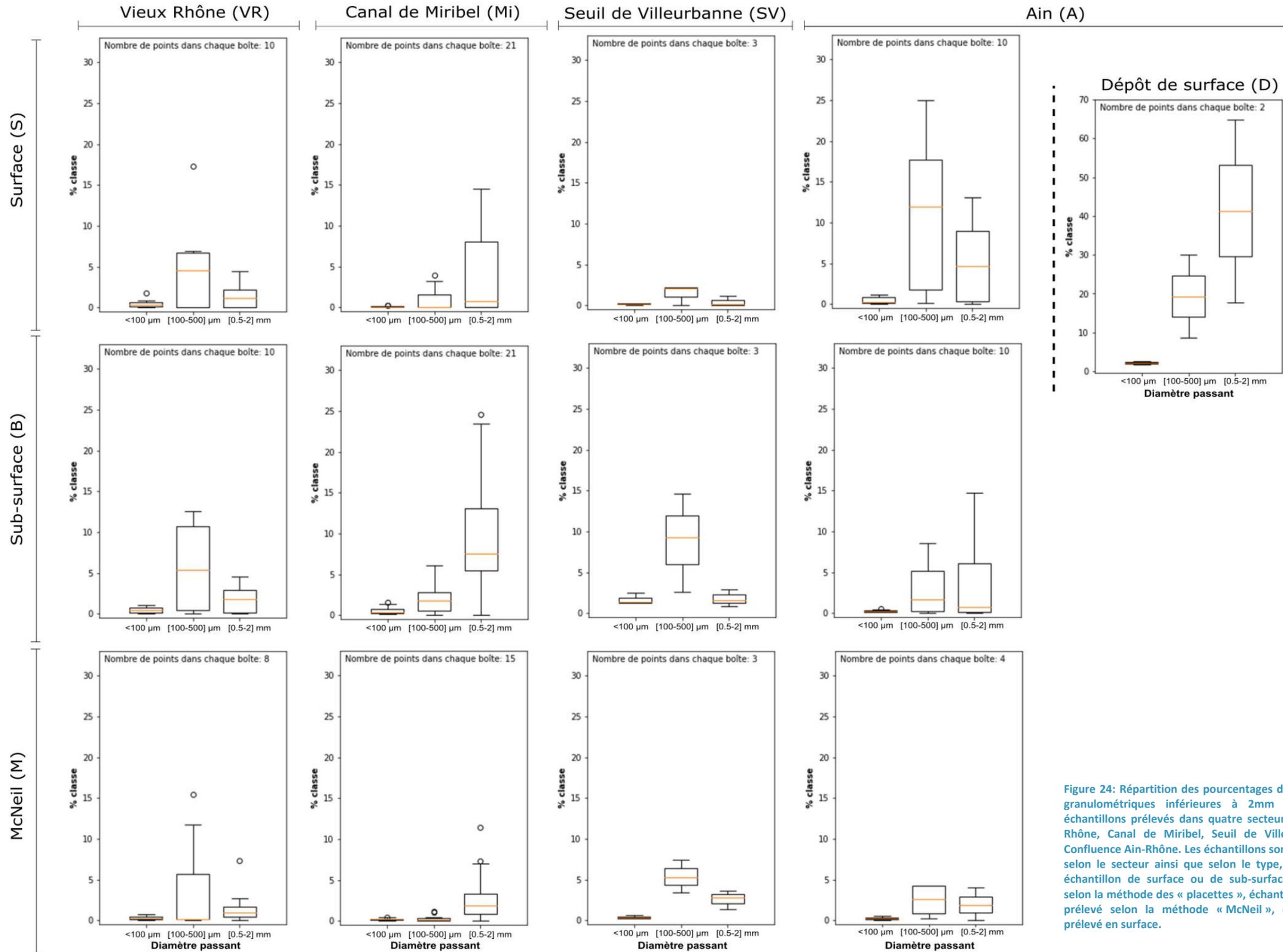


Figure 24: Répartition des pourcentages des classes granulométriques inférieures à 2mm pour les échantillons prélevés dans quatre secteurs : Vieux-Rhône, Canal de Miribel, Seuil de Villeurbanne, Confluence Ain-Rhône. Les échantillons sont séparés selon le secteur ainsi que selon le type, à savoir, échantillon de surface ou de sub-surface prélevé selon la méthode des « placettes », échantillon total prélevé selon la méthode « McNeil », ou dépôt prélevé en surface.

III.2.3. Analyse de la granulométrie de surface : comparaison de deux méthodes

Les calculs pour la mise en mouvement des particules constituant le lit du cours d'eau nécessitent d'associer à chaque zone, pour la surface, une valeur de d_{90} , diamètre correspondant à 90 % de passant (en masse) ainsi qu'une valeur de d_{50} , diamètre médian. La granulométrie de surface a cependant été mesurée de deux manières différentes : méthode « Wolman » appliquée sur le terrain (cf. Paragraphe II.2.3.) et méthode des « placettes » pour la couche de surface (cf. Paragraphe II.2.2.). Une comparaison est alors effectuée entre les d_{90} et d_{50} de surface mesurés selon la méthode « Wolman » et ceux déterminés à partir de la méthode des « placettes » (Figure 25). Cette comparaison a pour objectif de voir si les deux méthodes donnent des résultats similaires et, dans le cas contraire, de définir laquelle des valeurs de d_{90} et d_{50} utiliser dans les calculs.

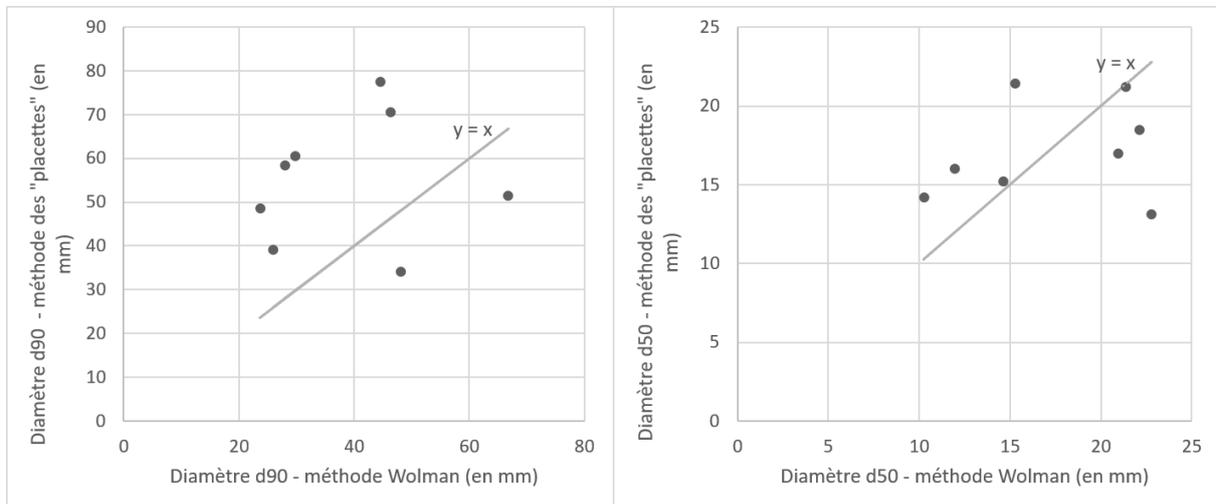


Figure 25 : Comparaison entre deux méthodes de détermination de la granulométrie de surface pour le d_{90} et le d_{50} : méthode de "Wolman" (Wolman, 1954) et méthode des "placettes" (Deng et al., 2022).

Les valeurs sont relativement dispersées, les résultats obtenus selon les deux méthodes sont plutôt différents. Néanmoins, une tendance se dégage avec estimation plus importante du d_{90} par la méthode des « placettes ». Plusieurs éléments sont à considérer pour comprendre les différences. Bien que les méthodes donnent des résultats de même type, à savoir des granulométries de surface, leur mode d'acquisition diffère. Dans le cas de la méthode « Wolman », seules les particules de surface, au sens strict du terme, sont collectées tandis que dans le cas de la méthode des « placettes » sont prélevées des particules qui ne sont pas visibles en surface (sens strict). Les caractéristiques granulométriques peuvent alors être biaisées. De plus, les modes opératoires diffèrent. La méthode de Wolman est une méthode statistique avec une certaine intégration spatiale du fait de la mesure des particules situées le long d'une ligne - fictive ou matérielle - alors que la méthode par prélèvement est a priori plus vraie (mesure directe) mais peut-être biaisée du fait du faible volume de l'échantillon (Church et al., 1987) ou de la non-représentativité (mesure locale).

Pour la suite il est choisi d'utiliser les caractéristiques granulométriques d_{90} et d_{50} déterminées selon la méthode des placettes. En effet, la méthode « Wolman » n'a pas pu être réalisée sur l'ensemble des bancs prospectés car le temps de manipulations sur le terrain était restreint, et l'utilisation de ses résultats nécessiterait de plus importantes extrapolations qu'en utilisant les résultats des « placettes ».

III.3. Stocks de sables

L'analyse des données granulométriques montre que les zones supposées homogènes par observation visuelle sur le terrain ne sont pas aberrantes et qu'elles peuvent être utilisées comme « zones homogènes » dans cette partie consacrée aux calculs de stocks de sable. Rappelons que la fraction sableuse est constituée des particules de diamètre compris entre 63 μm et 2 mm, mais que dans cette étude, la limite inférieure est de 100 μm pour des raisons matérielles.

III.3.1. Stocks locaux

Les stocks locaux, ou ponctuels, de l'ensemble des échantillons sont calculés selon les méthodes décrites précédemment (Paragraphe II.3.3). Ils sont représentés en Figure 26 sous la forme de diagrammes en boîte, en distinguant surface (stocks surfaciques en kg.m^{-2}), sub-surface et « McNeil » (stocks volumiques en kg.m^{-3}). Les dépôts prélevés sur l'Ain ne sont pas intégrés à la suite.

Les valeurs médianes indiquent que les stocks de sable en surface sur l'Ain sont plus importants que dans les deux autres secteurs, avec des valeurs de l'ordre de 5 kg.m^{-2} pour le banc de l'Ain, 1 kg.m^{-2} pour les bancs du canal de Miribel et seuil de Villeurbanne et 4 kg.m^{-2} pour les bancs du Vieux-Rhône. A l'inverse, les stocks de sub-surface sont plus faibles sur l'Ain avec une valeur médiane de près de 20 kg.m^{-3} contre 175 kg.m^{-3} pour les bancs du canal de Miribel et seuil de Villeurbanne et 80 kg.m^{-3} pour les bancs du Vieux Rhône. Les stocks sont néanmoins très variables à l'échelle des trois grands secteurs. En effet, certains stocks ponctuels sont particulièrement élevés – jusqu'à près de 850 kg.m^{-3} pour l'un des échantillons de sub-surface.

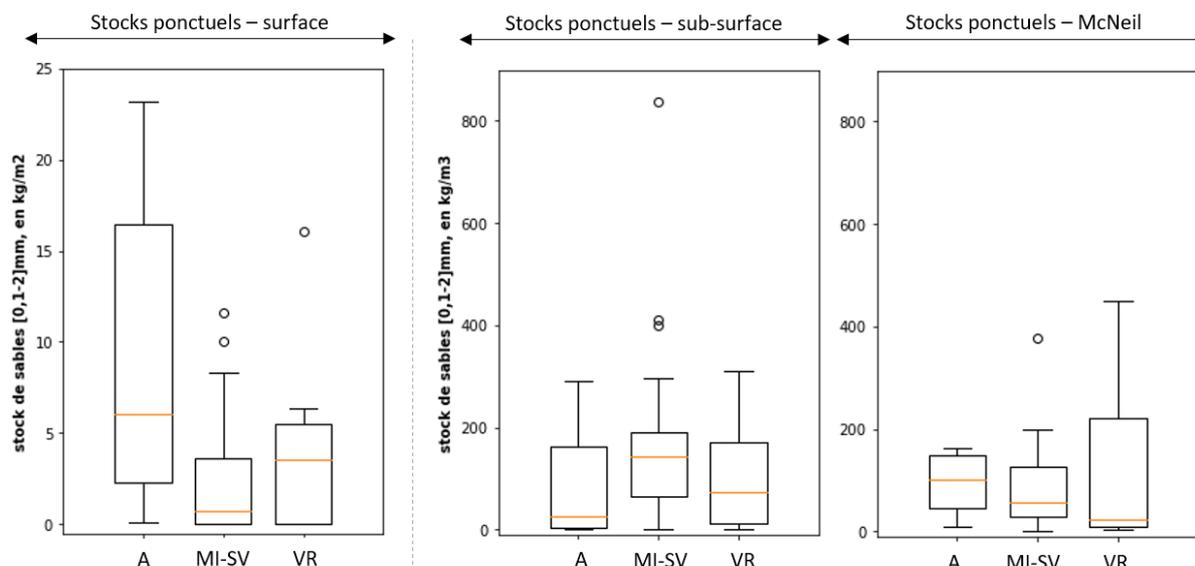


Figure 26 : Stocks ponctuels de sables en surface, sub-surface et dans le chenal en eau (« McNeil »). Les abréviations A, MI-SV et VR correspondent respectivement aux trois grands secteurs d'études : « Ain », « Canal de Miribel et seuil de Villeurbanne » et « Vieux Rhône ».

En supposant une épaisseur de surface de 80 mm – correspondant au d_{90} moyen sur l'ensemble du secteur d'étude – on peut déterminer des stocks ponctuels volumiques en surface, afin de les comparer aux stocks en sub-surface. La Figure 27 permet de remarquer que les stocks de sables en sub-surface sont plus importants que les stocks en surface pour les secteurs du Canal de Miribel et du Seuil de Villeurbanne. Pour l'Ain et le Vieux Rhône le constat diffère, les résultats sont variables ; aucune tendance ne se dégage du graphique.

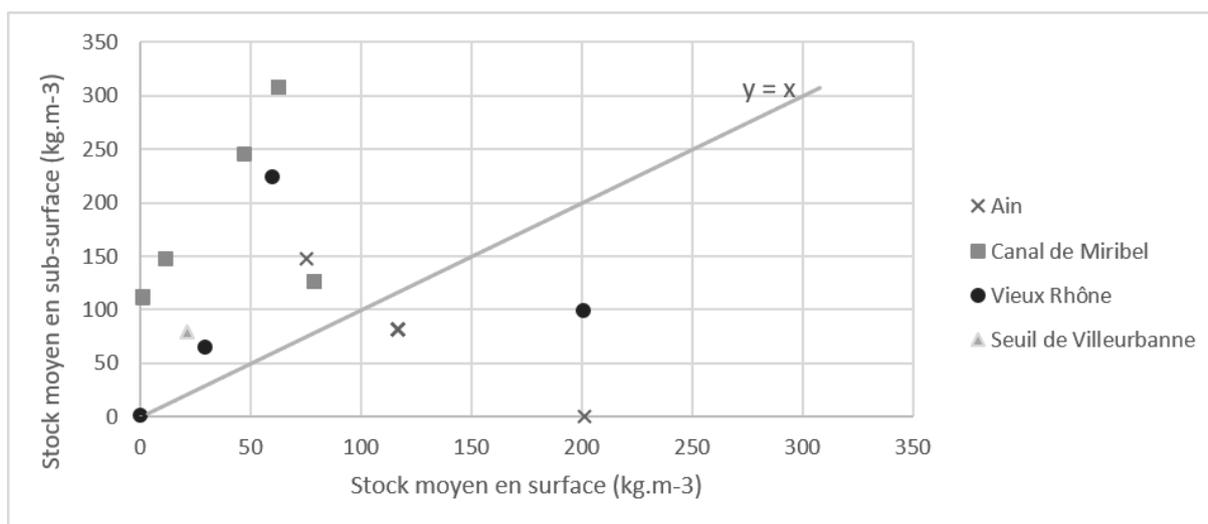


Figure 27 : Comparaison des stocks en surface et sub-surface, en supposant une épaisseur de surface de 80 mm.

De la même manière, les stocks en surface et les stocks en eau peuvent être comparés au travers de la Figure 28. Il apparaît que les stocks en eau sont souvent plus importants que les stocks en surface, hors eau, ce qui semble logique puisque les premiers intègrent à la fois la surface et la sub-surface.

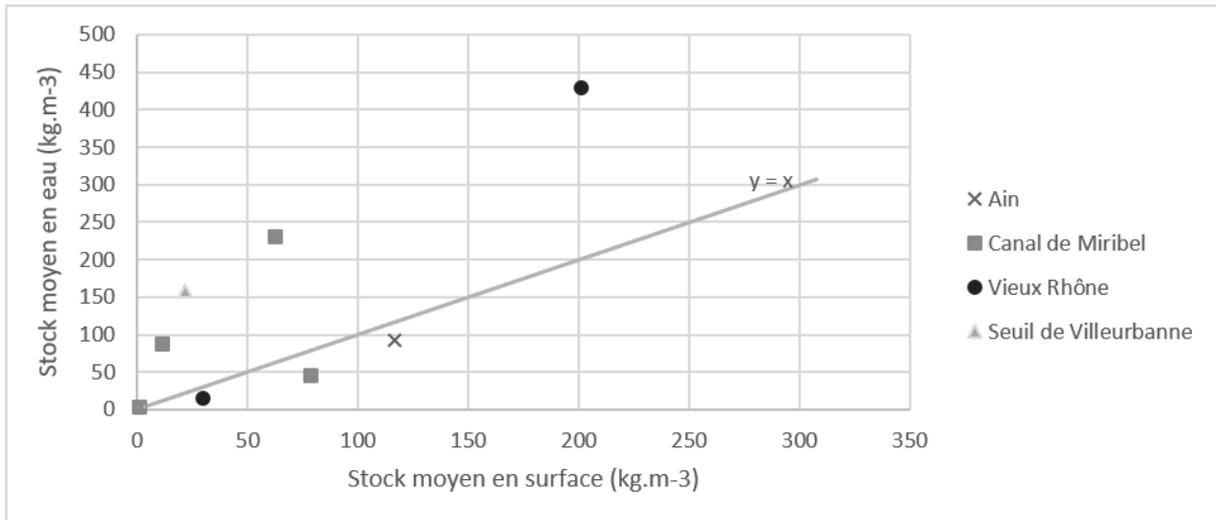


Figure 28 : Comparaison des stocks en surface et en eau, en supposant une épaisseur de surface de 80 mm.

Pour chaque zone homogène, les valeurs de stocks ponctuels sont moyennées afin de déterminer un stock de sable pour chacune. Comme précisé au Paragraphe II.4.3., les bancs non prospectés se voient attribuer la valeur de stock du banc le plus proche. Les stocks à l'issue de l'interpolation et de l'extrapolation sont compilés dans le Tableau 2.

III.3.2. Calcul des paramètres de mobilisation du lit

Léa Kieffer, Ingénieure de recherche à INRAE, a fait tourner le modèle hydro-sédimentaire 1-D du Rhône avec en entrée les paramètres relatifs au pic de crue de janvier 2018, à savoir, un débit max de respectivement 3050 et 1350 m³.s⁻¹ aux stations du Rhône « Lyon Perrache » et de l'Ain « Port Galland ». En sortie, le modèle a fourni, pour chaque section de chaque bief, la vitesse moyenne d'écoulement et le rayon hydraulique. Les coefficients de Strickler globaux K_s utilisés pour le calage sont également reprecisés pour chaque bief.

Les contraintes de cisaillement au fond sont ensuite calculées (cf. Paragraphe I.2.3. Équation (3)) et moyennées sur la longueur de chaque zone homogène grâce au traitement SIG (cf. Paragraphe II.4.2.). La largeur des zones homogènes n'étant pas constante, le calcul de la contrainte moyenne a pour objectif de réduire l'influence de cette inconstance. Ensuite, à partir des valeurs de contrainte de cisaillement au fond associées à chaque zone homogène ainsi que des paramètres granulométriques moyens, sont calculés : la contrainte effective (Équation (4)), le paramètre de Shields (Équation (6)) et l'épaisseur d'érosion (Équation (7)).

III.3.3. Stocks totaux

Les résultats précédents permettent d'envisager l'évaluation des stocks totaux de sables qui constitue l'objectif principal de l'étude. Pour ce faire, l'Équation (9) est appliquée pour les valeurs compilées dans le tableau de synthèse (Tableau 2). Dans les résultats, il est automatiquement considéré que le stock de surface est remis en suspension.

Tableau 2 : Synthèse des informations relatives à chaque zone homogène. Les noms de zones apparaissant en caractères gras correspondent aux zones des bancs prospectés. Les d_{50} et d_{90} sont déterminés par la méthode des « placettes ».

ZONE HOMOGENE	AIRE DE LA ZONE HOMOGENE (EN M²)	d_{50} MOYEN EN SURFACE (EN MM)	d_{90} MOYEN EN SURFACE (EN MM)	STOCK MOYEN EN SURFACE (EN KG.M⁻²)	STOCK MOYEN EN SUB- SURFACE (EN KG.M⁻³)	EPAISSEUR D'EROSION (EN M)	STOCK (MASSE EN T)
A02-B	33 672	19	78	9,34	81,7	0,0075	335
A02-HB	17 574	15	39	6,04	147,21	0,0069	124
A02-NC	2 281	11	34	16,13	0,2	0,0068	37
ANP01	8 093	19	78	9,34	81,7	0,0100	82
ANP02	5 552	19	78	9,34	81,7	0,0054	54
ANP03	1 954	19	78	9,34	81,7	0,0027	19
A01-B	44 499	19	78	9,34	81,7	0,0011	419
A01-CS	16 462	19	78	9,34	81,7	0,0011	155
ANP04	6 187	19	78	9,34	81,7	0,0099	63
MI13	6 905	21	71	5,021	307,81	0,0126	62
MI12	4 575	21	71	5,021	307,81	0,0152	44
MI11	2 729	21	71	5,021	307,81	0,0146	26
MI10	22 575	48	150	0,1099	111,45	0,0130	35
MI09-B	3 132	16	60	6,288	126,68	0,0070	22
MI09-HB	3 515	57	155	3,8	245,74	0,0073	20
MI08	5 061	16	60	6,288	126,68	0,0090	38
MI07	5 223	16	60	6,288	126,68	0,0124	41
MI05	8 823	21	58	0,9286	147,52	0,0149	28
MI04	17 622	21	58	0,9286	147,52	0,0145	54
MI03	5 175	31	100	0,09	112,03	0,0152	9
MI02	1 993	31	100	0,09	112,03	0,0141	3
MI01	1 014	31	100	0,09	112,03	0,0172	2
VR01-B	15 726	17	51	2,37	65,18	0,0036	41
VR01-CS	10 635	14	49	4,79	224,5	0,0034	59
VR02-B	9 342	26	102	0,0145	1,03	0,0114	< 1
VR02-HB	2 911	17	57	16,08	99,21	0,0121	50
SV	21 804	27	100	1,72	79,68	0,0018	41
SVNP01	2 020	27	100	1,72	79,68	0,0010	4

Le stock total, par cumul des stocks de chaque zone, vaut 1 900 tonnes. On compte 1 300 tonnes en provenance des bancs localisés à la confluence Ain-Rhône (cf. Annexe 3 et Annexe 4). Ensuite,

1 600 tonnes des sables mobilisés correspondent à la remis en suspension de la couche de surface ; les 300 tonnes restantes viennent de la sub-surface (Annexe 6).

Pour finir, les stocks totaux sont également distingués selon la granulométrie. Globalement, la fraction des sables fins - ceux dont le diamètre est compris entre 100 et 500 μm – correspond à 3/5^{ème} des sables mobilisés ; les 2/5^{ème} restant sont des sables grossiers ([0.5 – 2 mm]).

Pour comparaison, près de 80 tonnes de particules fines – diamètre inférieur à 100 μm – sont estimées être mobilisées pour un événement hydrologique tel que la crue de janvier 2018. Notons que cette quantité est exclue du stock total de 1 900 tonnes puisqu'il ne s'agit pas exclusivement de sables.

IV. Discussion

IV.1. Exploitation des résultats

La réalisation de campagnes de terrain sur l'ensemble du secteur du Rhône Amont a permis de collecter un grand nombre de sédiments qui ont été caractérisés au travers de leur granulométrie. Ajoutés à la spatialisation des données et à la modélisation du pic de la crue de janvier 2018, ces résultats ont tout d'abord mené à l'estimation de stocks locaux de sables, puis de stocks de sables mobilisables. Le stock total estimé est de 1 900 tonnes. Rappelons que cette étude fait suite à l'étude réalisée par Guillaume Dramais dans le cadre de sa thèse (Dramais, 2020). Un flux de sables de 175 000 tonnes avait été mesuré au pic de la crue de janvier 2018, soit près de 100 fois plus que ce qui est estimé dans la présente étude. Une des questions posées dans la thèse est : "d'où proviennent ces sables ?". Et il semblerait que leur intégralité ne provient pas du secteur du Rhône en amont de Lyon.

Plusieurs éléments sont cependant à prendre en compte dans la comparaison de ces valeurs de stocks.

Tout d'abord, le secteur du Rhône Amont ne représente qu'une partie des sources en sédiments, bien qu'une quantité probablement importante soit retenue par les barrages.

Ensuite, les valeurs de flux de sable et de stock de sable mobilisable correspondent à deux temporalités différentes. En effet, le flux a été mesuré en 2018 tandis que les campagnes de prélèvement pour la présente étude ont été réalisées entre mars et juin 2022. Le renouvellement des stocks nécessite probablement un plus long terme que quatre années.

Enfin, il existe aussi des limites quant à nos hypothèses de travail pour évaluer ces stocks.

IV.2. Discussion des hypothèses

Plusieurs hypothèses ont progressivement été retenues pour le calcul des stocks. De même que les éléments présentés ci-dessus, il convient de les rappeler et de les questionner.

En premier lieu, la quantité de sable dans les chenaux en eau est négligée sur la totalité du linéaire. Seul le stock émergé est pris en compte. Pourtant, bien que dans l'ensemble les stocks de sable mesurés dans le chenal soient faibles, certaines valeurs atteintes ne sont pas négligeables, comme, par exemple, au niveau du banc VR02. Néanmoins, la méthode de prélèvement en eau ne permet le prélèvement qu'aux abords des bancs, là où les hauteurs d'eau sont faibles. Les résultats obtenus

pourraient ne pas refléter les stocks dans les zones plus profondes du chenal, et dans ce cas une extrapolation à l'ensemble du chenal en eau serait aberrante.

Aussi, l'érosion est seulement considérée verticalement dans le calcul de l'épaisseur d'érosion alors qu'il peut y avoir de l'érosion latérale – sapement de berges. Encore, dans le cas d'une avulsion, c'est-à-dire la formation d'un nouveau chenal après abandon de l'ancien, les quantités de sédiments repris peuvent varier considérablement. Ce peut être le cas pour l'Ain qui est particulièrement mobile. Dans de nombreuses rivières, le volume remobilisé par sapement de berge ou avulsion du chenal est bien plus important que par l'érosion du fond (Deng, 2022). Ceci est clairement le cas pour l'Ain où la position du chenal principal sur sa partie aval varie beaucoup au gré des crues (Figure 29). De la même manière, il est possible que certains bancs de Miribel subissent un sapement de berge dans leur partie amont comme souvent observé pour des rivières de piémont endiguées (Serlet et al., 2018). Un nouveau calcul du volume en prenant en compte cette possible mobilité du chenal et/ou des bancs serait utile pour réévaluer ces stocks.



Figure 29 : Evolution de l'Ain, à sa confluence avec le Rhône, entre 2008 et 2021. Source des photographies : IGN

Une autre hypothèse a été de négliger l'apport du canal de Jonage, en considérant que la dynamique ne varie pas particulièrement en cas de crue puisque le débit du canal reste autour de $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour l'alimentation de la centrale hydroélectrique de Cusset. De plus, aucun banc n'a été repéré sur le canal et sa morphologie ne permet pas la mise en place de nos méthodes de prélèvement. Ainsi, aucun prélèvement n'a pu être réalisé dans cette portion. Des analyses commanditées par EDF nous ont été fournies puisqu'elles sont intégrées au programme de recherche OSR. Il s'agit de prélèvements sous la forme de carottes cryogéniques qui montrent que des quantités de sable d'au maximum 8% dans le secteur qu'ils ont prospecté. L'ordre de grandeur est donc globalement le même que sur les bancs. Néanmoins, si la dynamique dans le canal de Jonage est stable du fait d'un débit globalement constant alors l'hypothèse ne semble pas aberrante.

Ensuite, les flux de sables circulant en permanence en suspension ne sont pas considérés ici puisqu'il ne s'agit pas de stocks. Pourtant ils sont inclus dans le flux de sable mesuré à la station Lyon-Perrache.

IV.3. Discussion des méthodes

La méthode présentée peut également limiter par plusieurs aspects l'estimation des stocks de sable.

Sur le terrain il peut être difficile pour l'opérateur de distinguer nettement une limite entre des zones homogènes du fait de la variabilité spatiale de la granulométrie. Il est également possible qu'une zone semble homogène en surface sans l'être pour autant en sub-surface. Ces aspects constituent par la suite un biais dans l'interpolation et donc dans les estimations de stocks. De plus, certaines zones, bien que végétalisées pourraient constituer une source de sable mais ne sont pas prises en compte dans notre étude. En effet, l'une des hypothèses formulées est que les zones de végétation auront tendance à retenir les sédiments lors des crues puisque leur rugosité génère une diminution des vitesses d'écoulement localement, induisant un dépôt de particules. Néanmoins, selon l'ampleur de la crue, il pourrait être envisagé que les dépôts de sable soient tout de même mobilisés. L'une des problématiques est qu'il est difficile d'acquérir des données GPS fiables dans les zones de végétation.

Ensuite, la quantification des épaisseurs de dépôt nécessite d'utiliser d'autres méthodes que celles utilisées pour la quantification des stocks. Une méthode peut être de mesurer l'épaisseur du dépôt, à l'aide d'un régleur qui permet de sentir un changement textural. Plusieurs mesures de ce type, suivant un tracé dépendant de la morphologie du dépôt, permettent ensuite de définir une épaisseur moyenne pour la zone de dépôt. Cette méthode a été réalisée partiellement sur certains dépôts observés, mais n'était pas évidente à mettre en place systématiquement en raison du temps limité. De plus, en présence de végétation il est difficile de savoir si un changement de texture est dû à un changement granulométrique ou s'il est dû à la présence de racines ou autres débris végétaux, faussant alors l'épaisseur mesurée.

Le modèle hydro-sédimentaire peut également introduire un biais dans l'estimation. Il est basé sur une géométrie correspondant approximativement aux années 2010 et le lit mineur ne correspond pas partout au lit actuel. C'est le cas vers la confluence Ain-Rhône notamment, où l'Ain est particulièrement mobile. La Figure 30 montre la discordance entre le lit mineur du modèle, au travers des sections du bief « Ain amont », et le lit de l'Ain en date du 14 avril 2022. Il est aussi à rappeler que nous avons utilisé ici un modèle unidimensionnel qui fournit une valeur moyenne de la contrainte au fond sur la section. De fortes variabilités locales liées à la géométrie aux écoulements 2D voire 3D peuvent induire des valeurs de contrainte significativement différentes localement.

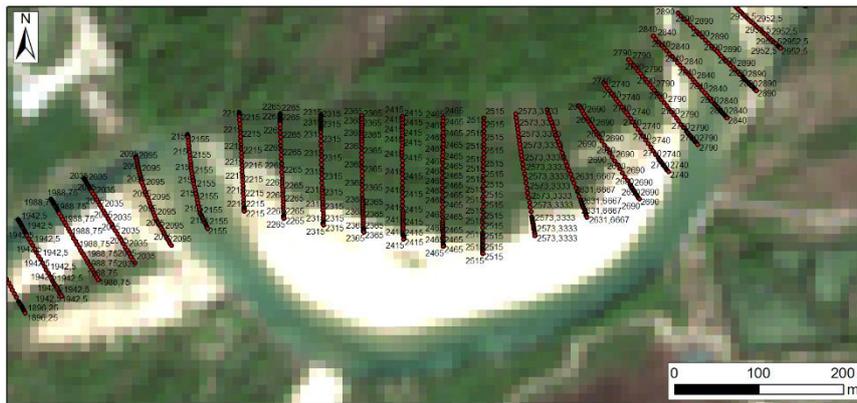


Figure 30 : Carte d'une partie du bief "Ain amont" intégré au modèle hydro-sédimentaire 1-D du Rhône. Fond: image Sentinel 2 du 14 avril 2022.

Néanmoins, l'objectif de ce travail était d'estimer les stocks de sables mobilisables. Une estimation n'est pas une valeur exacte, qui ne serait par ailleurs pas envisageable au vu de l'ensemble des paramètres à prendre en compte, qu'ils soient relatifs à la crue ou à la variabilité des bancs du tronçon, la présence ou non d'une couche armurée, etc.

IV.4. Propositions de poursuite

Afin d'approfondir l'étude, plusieurs projets semblent envisageables.

Une étude diachronique à partir de photographies d'avant et après la crue de janvier 2018 permettrait de qualifier voire quantifier l'évolution des bancs du secteur d'étude, ainsi que la mobilité de l'Ain au niveau de sa confluence avec le Rhône. Cela permettrait ainsi d'évaluer un possible volume érodé par sapement de berge suite à la crue de 2018 et donc réévaluer le stock de fines mobilisé.

Concernant les prélèvements en eau, il serait intéressant de prélever en eaux plus profondes afin d'alimenter la base de données et envisager de meilleures interpolation et extrapolation des stocks locaux. La plongée pourrait permettre ce type de prélèvements, en adaptant les méthodes. Il faudrait néanmoins tenir compte de potentielles incertitudes liées à la mise en suspension des sédiments fins lors du prélèvement. L'estimation des stocks immergés semble particulièrement importante car elle pourrait être non-négligeable du fait des surfaces très élevées.

Ensuite, la prise en compte des dépôts sableux, même s'ils sont végétalisés, pourrait améliorer l'estimation. Elle peut également être mise en parallèle avec des travaux qui seraient réalisés sur l'influence de la rugosité sur l'écoulement. La prise en compte des dépôts nécessite la recherche ou l'élaboration de nouvelles méthodes pour la mesure de leur épaisseur notamment.

Conclusions et perspectives

L'étude menée durant six mois au sein d'INRAE avait pour objectif d'évaluer les stocks actuels de sable dans le Rhône en amont de Lyon et d'estimer la part mobilisable pour une crue identique à celle de janvier 2018.

Les 120 prélèvements réalisés lors des campagnes de terrain ont permis de constituer une base conséquente de données relatives à la granulométrie des bancs de plusieurs secteurs : confluence Ain-Rhône, canal de Miribel, Vieux-Rhône et seuil de Villeurbanne. Leur analyse et leur spatialisation a ensuite permis d'établir une estimation, dans un premier temps, de stocks locaux - à l'échelle de l'échantillon d'abord et à l'échelle d'une zone supposée homogène ensuite. Dans un second temps, une simulation numérique des contraintes exercées par la crue de janvier 2018 a été mise en commun avec les résultats issus de l'analyse granulométrique du secteur d'étude, permettant d'estimer la part des sables qui est mobilisable lors d'un tel événement. Le stock mobilisable, d'une valeur d'environ 1 900 tonnes, est comparé au flux de sable mesuré à Lyon lors de la crue de 2018, à savoir 175 000 tonnes. De nombreux éléments peuvent expliquer les différences entre l'estimation du stock mobilisable et le flux mesuré. Ils sont notamment relatifs à la non-prise en compte des volumes issus de l'érosion de berge et de la mobilisation des dépôts, ainsi que des incertitudes liées à la mise en œuvre des prélèvements.

Cette étude mérite donc d'être complétée pour l'évaluation totale des stocks, d'une part par une meilleure évaluation des volumes mobilisés pendant la crue de 2018 en incluant les zones de sapement de berge et d'avulsion du chenal principal (dans le cas de l'Ain), d'autre part en incluant une estimation des volumes potentiellement remobilisés dans les zones immergées où a pour l'instant été faite l'hypothèse que les stocks étaient négligeables. Pour le premier point, il faudrait réaliser une analyse diachronique détaillée de la morphologie de la rivière avant et après l'événement si les photos aériennes sont disponibles (le site Remonter le temps ne permet pas d'avoir accès aux photographies aériennes récentes). Pour le second point, cela nécessiterait de réaliser de nouveaux prélèvements en eau ou de faire l'hypothèse que les prélèvements immergés avec le McNeil sont valables sur tout le chenal principal.

Réalisée dans le cadre de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR6), la base de données de terrain et les résultats qui en découlent pourront être utilisés dans de futurs projets, afin d'améliorer la connaissance de la dynamique hydro-sédimentaire du Rhône. Notamment, la comparaison de deux méthodes de prélèvement - méthode « McNeil » et méthode des « placettes » - pourra appuyer les résultats obtenus dans une étude du colmatage également réalisée dans le cadre de l'OSR et

menée par Peeters et al. (2022). Ces mesures pourront aussi être utilisées dans le cadre d'un projet financé par l'OFB (Office Français de la Biodiversité) sur l'évaluation de différentes méthodes de mesure du colmatage.

Références

Bibliographie

- Acornley, R. M., & Sear, D. A. (1999). Sediment transport and siltation of brown trout (*Salmo trutta* L.) spawning gravels in chalk streams. *Hydrological Processes*, 13(3), 447-458. Scopus. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990228\)13:3<447::AID-HYP749>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990228)13:3<447::AID-HYP749>3.0.CO;2-G)
- Agence de l'Eau RMC, BRLeingénierie, & Chazot, S. (2014). *Etude de la gestion quantitative et des débits du Rhône en période de « basses eaux ». Phase 1—Caractérisation du territoire du fleuve Rhône et bilan des influences anthropiques passées, actuelles et futures possibles.*
- Andries, E., Camenen, B., Faure, J. B., Le Coz, J., & Launay, M. (2012). *Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône à l'aide des modèles numériques Mage et Adis-TS* (p. 73) [Research Report]. irstea. <https://hal.inrae.fr/hal-02597381>
- Bravard, J.-P., Goichot, M., Tronchère, H., Bravard, J. P., Goichot, M., & Tronchere, H. (2014). An assessment of sediment-transport processes in the Lower Mekong River based on deposit grain sizes, the CM technique and flow-energy data. *Geomorphology, Complete*(207), 174-189. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.11.004>
- Bravard, J.-P., & Peiry, J.-L. (1993). La disparition du tressage fluvial dans les Alpes françaises sous l'effet de l'aménagement des cours d'eau (19-20ème siècle). *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 88, 67-79.
- Bravard, J.-P., & Petit, F. (1997). *Les cours d'eau : Dynamique du système fluvial* (Armand Colin). <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/150236/les-cours-d-eau-dynamique-du-systeme-fluvial>
- Bunte, K., & Abt, S. (2001a). Sampling Frame for Improving Pebble Count Accuracy in Coarse Gravel-Bed Streams1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(4), 1001-1014. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb05528.x>
- Bunte, K., & Abt, S. (2001b). Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Wadable Gravel- and Cobble-bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring. In *USD A-Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-74* (Vol. 74).
- Camenen, B., Larson, M., & Bayram, A. (2009). Equivalent roughness height for plane bed under oscillatory flow. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81(3), 14 p. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.11.019>
- Camenen, B., & Melun, G. (2021). *Guide pour la mesure et la modélisation du transport solide*. https://www.observatoire-poissons-seine-normandie.fr/wp-content/uploads/espace-prive/GP2021_TransportSolideRiviere.pdf
- Carling, P. A., & Reader, N. A. (1981). A freeze-sampling technique suitable for coarse river bed-material. *Sedimentary Geology*, 29(2), 233-239. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(81\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0037-0738(81)90009-9)
- Carling, P., & McCahon, C. (1987). *Natural Siltation of Brown Trout (Salmo trutta L.) Spawning Gravels During Low-Flow Conditions* (p. 229-244). https://doi.org/10.1007/978-1-4684-5392-8_15
- Church, M. A., McLean, D. G., & Wolcott, J. F. (1987). *River bed gravels : Sampling and analysis*.
- Clapcott, J., Young, R., Harding, J., Matthaei, C., Quinn, J., & Death, R. (2011). *Sediment assessment methods : Protocols and guidelines for assessing the effects of deposited fine sediment on in-stream values*. Cawthron Institute.

- Collins, A. L., & Walling, D. E. (2007). Sources of fine sediment recovered from the channel bed of lowland groundwater-fed catchments in the UK. *Geomorphology*, 88(1), 120-138. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.018>
- Collins, A. L., Williams, L. J., Zhang, Y. S., Marius, M., Dungait, J. A. J., Smallman, D. J., Dixon, E. R., Stringfellow, A., Sear, D. A., Jones, J. I., & Naden, P. S. (2013). Catchment source contributions to the sediment-bound organic matter degrading salmonid spawning gravels in a lowland river, southern England. *Science of The Total Environment*, 456-457, 181-195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.093>
- Collins, A., Walling, D., & Leeks, G. (2005). Storage of fine-grained sediment and associated contaminants within the channels of lowland permeable catchments in the UK. *IAHS-AISH Publication*, 259-268.
- Combe, C. (2004). Le risque d'inondation à l'amont de Lyon : Héritages et réalités contemporaines. *Géocarrefour*, 79(1), 63-73. <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.555>
- Cotton, J. A., Wharton, G., Bass, J. A. B., Heppell, C. M., & Wotton, R. S. (2006). The effects of seasonal changes to in-stream vegetation cover on patterns of flow and accumulation of sediment. *Geomorphology*, 77(3), 320-334. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.010>
- Coutterand, S., Schoeneich, P., & Nicoud, G. (2009). Le lobe glaciaire lyonnais au maximum würmien : Glacier du Rhône ou/et glaciers savoyards? *Collection EDYTEM. Cahiers de géographie*, 8(1), 11-22. <https://doi.org/10.3406/edyte.2009.1069>
- Coyne, A., Gorse, L., Curti, C., Schafer, J., Grosbois, C., Morelli, G., Ducassou, E., Blanc, G., Maillet, G. M., & Mojtahid, M. (2016). Spatial distribution of trace elements in the surface sediments of a major European estuary (Loire Estuary, France) : Source identification and evaluation of anthropogenic contribution. *Journal of Sea Research*, 118, 77-91. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2016.08.005>
- Davey, G. W., Doeg, T. J., & Blyth, J. D. (1987). Changes in benthic sediment in the Thomson river, Southeastern Australia, during construction of the Thomson dam. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1(1), 71-84. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450010108>
- Degoutte, G. (2012). *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : Hydraulique et morphologie fluviale appliquées. Hydraulique et morphologie fluviales appliquées.* (2nd édition). TEC & DOC.
- Deng, J. (2022). *Dynamique des sédiments fins dans les systèmes de bancs de galets alternés d'une rivière de montage aménagée.* [Thèse de doctorat]. Université de Lyon 1.
- Deng, J., Piednoir, T., Pénard, L., & Camenen, B. (2022). *Estimation of Fine Sediment Stocks in Alpine Rivers.* 10.
- Descloux, S., Datry, T., Philippe, M., & Marmonier, P. (2010). Comparison of Different Techniques to Assess Surface and Subsurface Streambed Colmation with Fine Sediments. *International Review of Hydrobiology*, 95(6), 520-540. <https://doi.org/10.1002/iroh.201011250>
- Domagalski, J. L., Morway, E., Alvarez, N. L., Hutchins, J., Rosen, M. R., & Coats, R. (2021). Trends in nitrogen, phosphorus, and sediment concentrations and loads in streams draining to Lake Tahoe, California, Nevada, USA. *Science of The Total Environment*, 752, 141815. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141815>
- Dramais, G. (2020) *Observation et modélisation des flux de sable dans les grands cours d'eau.* Thèse réalisée à l'Université de Lyon.
- Droppo, I., D'Andrea, L., Krishnappan, B., Jaskot, C., Trapp, B., Basuvaraj, M., & Liss, S. (2014). Fine-sediment dynamics : Towards an improved understanding of sediment erosion and transport. *Journal of Soils and Sediments*, 15, 467-479. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-1004-3>

- Duerdoth, C. P., Arnold, A., Murphy, J. F., Naden, P. S., Scarlett, P., Collins, A. L., Sear, D. A., & Jones, J. I. (2015). Assessment of a rapid method for quantitative reach-scale estimates of deposited fine sediment in rivers. *Geomorphology*, 230, 37-50. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.11.003>
- Estrany, J., Garcia, C., Walling, D. E., & Ferrer, L. (2011). Fluxes and storage of fine-grained sediment and associated contaminants in the Na Borges River (Mallorca, Spain). *CATENA*, 87(3), 291-305. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.06.009>
- Faure, J.-B. (2016). *MAGE - Résolution des équations de Barré de Saint-Venant 1D en réseaux complexes. Documentation théorique et notice d'emploi.*
- Gibbs, R. J. (1977). Transport phases of transition metals in the Amazon and Yukon Rivers. *Geological Society of America Bulletin*, 88, 829-843. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88<829:TPOTMI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<829:TPOTMI>2.0.CO;2)
- Gurnell, A. M., & Bertoldi, W. (2022). The impact of plants on fine sediment storage within the active channels of gravel-bed rivers: A preliminary assessment. *Hydrological Processes*, 36(7), e14637. <https://doi.org/10.1002/hyp.14637>
- Hjulström, F. (1935). Studies of Morphological Activity of Rivers as Illustrated by the River Fyris. *Bulletin of the Geological Institute University of Uppsala*, 25, 221-527.
- Horowitz, A. J. (1991). *A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry, 2nd. Edition. 2nd Edition*, 142.
- Horowitz, A. J., & Elrick, K. A. (1987). The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry. *Applied Geochemistry*, 2(4), 437-451. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(87\)90027-8](https://doi.org/10.1016/0883-2927(87)90027-8)
- Kellerhals, R., & Bray, D. I. (1971). Sampling Procedures for Coarse Fluvial Sediments. *Journal of the Hydraulics Division*, 97(8), 1165-1180. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003044>
- Kondolf, G. M. (1997). Hungry Water : Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*, 21(4), 533-551. <https://doi.org/10.1007/s002679900048>
- Kozerski, H.-P. (2002). Determination of areal sedimentation rates in rivers by using plate sediment trap measurements and flow velocity—Settling flux relationship. *Water Research*, 36(12), 2983-2990. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00533-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00533-4)
- Kronvang, B., Laubel, A., Larsen, S. E., & Friberg, N. (2003). Pesticides and heavy metals in Danish streambed sediment. *Hydrobiologia*, 494(1), 93-101. <https://doi.org/10.1023/A:1025441610434>
- Lambert, C. P., & Walling, D. E. (1988). Measurement of channel storage of suspended sediment in a gravel-bed river. *CATENA*, 15(1), 65-80. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(88\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0341-8162(88)90017-3)
- Landon, N. (1999). *L'évolution contemporaine du profil en long des affluents du Rhône moyen : Constat régional et analyse d'un hydrosystème complexe : la Drôme* [These de doctorat, Paris 4]. <http://www.theses.fr/1998PA040295>
- Lane, E. W. (1955). The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering. *Hydraulic Laboratory Report, No. 372*, 19.
- Larsen, S., Vaughan, I. P., & Ormerod, S. J. (2009). Scale-dependent effects of fine sediments on temperate headwater invertebrates. *Freshwater Biology*, 54(1), 203-219. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02093.x>
- Le Coz, J., Camenen, B., Faure, J.-B., Launay, M., Troudet, L., Kieffer, L., Boyer, P., Radakovitch, O., & Verney, R. (2021). *Modélisation des flux – Modèle hydro-sédimentaire 1D* (p. 57) [Research Report]. INRAE ; IFREMER. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03293557>

- Leonard, R. L., Kaplan, L. A., Elder, J. F., Coats, R. N., & Goldman, C. R. (1979). Nutrient Transport in Surface Runoff from a Subalpine Watershed, Lake Tahoe Basin, California. *Ecological Monographs*, 49(3), 281-310. <https://doi.org/10.2307/1942486>
- Leopold, L. B., & Wolman, M. G. (1957). River channel patterns : Braided, meandering, and straight. In *Professional Paper* (N° 282-B). U.S. Geology Survey. <https://doi.org/10.3133/pp282B>
- Lisle, T. E. (1989). Sediment transport and resulting deposition in spawning gravels, north coastal California. *Water Resources Research*, 25(6), 1303-1319. Scopus. <https://doi.org/10.1029/WR025i006p01303>
- Malavoi, J.-R., Garnier, C.-C., Landon, N., Recking, A., & Baran, P. (Éds.). (2011). *Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière*. ONEMA.
- Marttila, H., & Kløve, B. (2014). Storage, properties and seasonal variations in fine-grained bed sediment within the main channel and headwaters of the River Sanginjoki, Finland : STORAGE OF FINE-GRAINED BED SEDIMENT. *Hydrological Processes*, 28(17), 4756-4765. <https://doi.org/10.1002/hyp.9953>
- McCarron, C. J., Van Landeghem, K. J. J., Baas, J. H., Amoudry, L. O., & Malarkey, J. (2019). The hiding-exposure effect revisited : A method to calculate the mobility of bimodal sediment mixtures. *Marine Geology*, 410, 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.12.001>
- McNeil, W. J., & Ahnell, W. H. (1964). Success of pink salmon spawning relative to size of spawning bed materials. *US Department of the Interior, Bureau of Commercial Fisheries. Special Scientific Report-Fisheries*, 469, 17.
- Meade, R. H. (1982). Sources, Sinks, and Storage of River Sediment in the Atlantic Drainage of the United States. *The Journal of Geology*, 90(3), 235-252.
- Misset, C., Recking, A., Legout, C., Viana-Bandeira, B., & Poirel, A. (2021). Assessment of fine sediment river bed stocks in seven Alpine catchments. *CATENA*, 196, 104916. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104916>
- Navratil, O., Legout, C., Gateuille, D., Esteves, M., & Liebault, F. (2010). Assessment of intermediate fine sediment storage in a braided river reach (southern French Prealps). *Hydrological Processes*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/hyp.7594>
- Owens, P. N., Batalla, R. J., Collins, A. J., Gomez, B., Hicks, D. M., Horowitz, A. J., Kondolf, G. M., Marden, M., Page, M. J., Peacock, D. H., Petticrew, E. L., Salomons, W., & Trustrum, N. A. (2005). Fine-grained sediment in river systems : Environmental significance and management issues. *River Research and Applications*, 21(7), 693-717. <https://doi.org/10.1002/rra.878>
- Owens, P. N., Walling, D. E., & Leeks, G. J. L. (1999). Deposition and storage of fine-grained sediment within the main channel system of the River Tweed, Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(12), 1061-1076. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199911\)24:12<1061::AID-ESP35>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199911)24:12<1061::AID-ESP35>3.0.CO;2-Y)
- Owens, P., & Walling, D. (2002). The Phosphorus Content of Fluvial Sediment in Rural and Industrialized River Basins. *Water research*, 36, 685-701. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00247-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00247-0)
- Parker, G., Toro-Escobar, C. M., Ramey, M., & Beck, S. (2003). Effect of Floodwater Extraction on Mountain Stream Morphology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(11), 885-895. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:11\(885\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:11(885))
- Peeters, A., Sirven, D., Tissot, N., Parmentier, H., Vukelic, S., Navratil, O., Piégay, H., Camenen, B., & Bonnefoy, A. (2022). *Évaluation de l'état des habitats benthiques du Rhône. Campagnes de terrain sur 10 stations réparties sur le Rhône. OSR6 | Axe C - Action C1 | Rapport scientifique intermédiaire* [Report]. CNRS ; INRAE. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03750527>

- Piégay, H. (1995). *Dynamiques et gestion de la ripisylve de cinq cours d'eau à charge grossière du bassin du Rhône (l'Ain, l'Ardèche, le Giffre, l'Ouvèze et l'Ubaye), XIXème-XXème siècles* (p. 529 p.) [Phdthesis, Thèse de doctorat de Géographie et Aménagement - Université Paris IV - Sorbonne, mars 1995]. <https://hal.inrae.fr/tel-02609166>
- Poinsart, D. (1992). *Effets des aménagements fluviaux sur les débits liquides et solides : L'exemple du Rhône dans les plaines de Miribel-Jonage et de Donzère-Mondragon* [These de doctorat, Lyon 3]. <http://www.theses.fr/1992LYO31003>
- Quinn, J. M., Cooper, A. B., Davies-Colley, R. J., Rutherford, J. C., & Williamson, R. B. (1997). Land use effects on habitat, water quality, periphyton, and benthic invertebrates in Waikato, New Zealand, hill-country streams. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 31(5), 579-597. <https://doi.org/10.1080/00288330.1997.9516791>
- Recking, A. (2008). Variation du nombre de Shields critique avec la pente. *La Houille Blanche*, 94(5), 59-63. <https://doi.org/10.1051/lhb:2008055>
- Rees, J. G., Ridgway, J., Knox, R. W. O. B., Wiggans, G., & Breward, N. (1999). Sediment-borne Contaminants in Rivers Discharging into the Humber Estuary, UK. *Marine Pollution Bulletin*, 37(3), 316-329. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00055-7](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00055-7)
- Rehg, K. J., Packman, A. I., & Ren, J. (2005). Effects of suspended sediment characteristics and bed sediment transport on streambed clogging. *Hydrological Processes*, 19(2), 413-427. Scopus. <https://doi.org/10.1002/hyp.5540>
- Roux, A.-L. (1982). Le Haut-Rhône français : Lieu privilégié d'une recherche interdisciplinaire sur la gestion écologique des ressources en eau. *Géocarrefour*, 57(1), 5-6.
- Schälchli, U. (1992). The clogging of coarse gravel river beds by fine sediment. In B. T. Hart & P. G. Sly (Éds.), *Sediment/Water Interactions* (p. 189-197). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2783-7_16
- Schumms, A. (1977). *The fluvial system* (Wiley&sons).
- Serlet, A., Gurnell, A., Zolezzi, G., Wharton, G., Belleudy, P., & Jourdain, C. (2018). Biomorphodynamics of alternate bars in a channelized, regulated river : An integrated historical and modelling analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43. <https://doi.org/10.1002/esp.4349>
- Shields, A. (1936). *Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement*. <https://authors.library.caltech.edu/25992/1/Sheilds.pdf>
- Slater, L. (2007). *Caractérisation des rivières en tresses françaises* [Unpublished MSc Thesis]. ENS Lyon.
- SOGREAH. (2000). *Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône-Etude du transport solide-2ème étape : Bilan et perspectives*. SOGREAH. <https://side.developpement-durable.gouv.fr/NVAQ/doc/SYRACUSE/784536/etude-globale-pour-une-strategie-de-reduction-des-risques-dus-aux-crues-du-rhone-etude-du-transport->
- Soulsby, C., Youngson, A. F., Moir, H. J., & Malcolm, I. A. (2001). Fine sediment influence on salmonid spawning habitat in a lowland agricultural stream : A preliminary assessment. *Science of The Total Environment*, 265(1), 295-307. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00672-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00672-0)
- Terrier, B., & Piégay, H. (2019). *Les rivières en tresses—Eléments de connaissance*. https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2019-09/guide_riviere_en_tresses_v27_complet.pdf

- Tritthart, M., Haimann, M., Habersack, H., & Hauer, C. (2019). Spatio-temporal variability of suspended sediments in rivers and ecological implications of reservoir flushing operations. *River Research and Applications*, 35(7), 918-931. <https://doi.org/10.1002/rra.3492>
- Van Rijn, L. C. (2007). Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I : Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6), 649-667. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:6\(649\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:6(649))
- Vargas-Luna, A., Crosato, A., & Uijttewaal, W. (2015). Effects of vegetation on flow and sediment transport : Comparative analyses and validation of predicting models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40. <https://doi.org/10.1002/esp.3633>
- Wagenhoff, A., Townsend, C. R., Phillips, N., & Matthaei, C. D. (2011). Subsidy-stress and multiple-stressor effects along gradients of deposited fine sediment and dissolved nutrients in a regional set of streams and rivers. *Freshwater Biology*, 56(9), 1916-1936. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2011.02619.x>
- Wainwright, J., Parsons, A. J., Cooper, J. R., Gao, P., Gillies, J. A., Mao, L., Orford, J. D., & Knight, P. G. (2015). The concept of transport capacity in geomorphology. *Reviews of Geophysics*, 53(4), 1155-1202. <https://doi.org/10.1002/2014RG000474>
- Walkotten, W. J., Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station (Portland, O., & United States. (1976). *An improved technique for freeze sampling streambed sediments*. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. <https://catalog.hathitrust.org/Record/007412553>
- Walling, D. E. (1983). The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 65(1), 209-237. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90217-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90217-2)
- Walling, D. E., Collins, A. L., & McMellin, G. K. (2003). A reconnaissance survey of the source of interstitial fine sediment recovered from salmonid spawning gravels in England and Wales. *Hydrobiologia*, 497(1), 91-108. <https://doi.org/10.1023/A:1025413721647>
- Walling, D., Russell, & Webb, B. (2001). Controls on the nutrient content of suspended sediment transported by British rivers. *The Science of the total environment*, 266, 113-123. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00746-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00746-4)
- Wentworth, C. K. (1922). A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), 377-392.
- Wilson, K. C. (1989). Friction of wave-induced sheet flow. *Coastal Engineering*, 12(4), 371-379. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(89\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0378-3839(89)90013-6)
- Wolman, M. G. (1954). A method of sampling coarse river-bed material. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 35(6), 951-956. <https://doi.org/10.1029/TR035i006p00951>
- Wolman, M. G. (1977). Changing needs and opportunities in the sediment field. *Water Resources Research*, 13(1), 50-54. <https://doi.org/10.1029/WR013i001p00050>
- Wood, P. j., & Armitage, P. d. (1999). Sediment deposition in a small lowland stream—Management implications. *Regulated Rivers: Research & Management*, 15(1-3), 199-210. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199901/06\)15:1/3<199::AID-RRR531>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199901/06)15:1/3<199::AID-RRR531>3.0.CO;2-0)
- ZABR, Bravard, J.-P., & Clémens, A. (2008). *Le Rhône en 100 questions*. <https://www.zabr.assograie.org/le-rhone-en-100-questions/>

Sitographie

<https://www.data.gouv.fr/> : base de données cartographiques CLC 2012

<https://geoservices.ign.fr/> : bases de données cartographiques et photographiques - IGN

<https://www.hydro.eaufrance.fr/> : base de données hydrologiques

<https://bdoh.irstea.fr/> : base de données des observatoires en hydrologie

<https://reseau-orpheon.fr/> : réseau de correction et amélioration de données GPS

<https://www.legifrance.gouv.fr/> : textes de loi en France

<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> : plateforme d'accès aux images des satellites européens

<https://www.eaufrance.fr/> : service public d'information sur l'eau

<https://infoterre.brgm.fr/> : base de données géologiques - BRGM

UNIT. (2014, 20 novembre). *Lois physiques. Transport solide par charriage (1)*. [Vidéo]. Canal-U.

<https://www.canal-u.tv/81525>. (Consultée le 3 août 2022)

<https://remonterletemps.ign.fr/> : bibliothèque photographique et cartographique - IGN

<https://www.geoportail.gouv.fr/> : portail national de la connaissance du territoire - IGN

Annexes

Annexe 1 : Classification granulométrique de Wentworth, d'après Bunte & Abt (2001b)..... 63

Annexe 2: Carte de l'Etat-major (1820-1866) annotée avec l'emplacement des limites de la zone d'étude. Source : IGN 64

Annexe 3 : Panneau cartographique présentant l'état de la prospection sur le secteur d'étude ainsi que le secteur « Canal de Miribel et seuil de Villeurbanne ». Fonds de carte : Image Sentinel 2 du 14 avril 2022 pour la carte générale ; BD Ortho de l'IGN pour les cartes localisées..... 64

Annexe 4 : Panneau cartographique des secteurs « Vieux Rhône » et « Ain ». Fonds de carte : BD Ortho de l'IGN. 64

Annexe 5 : Synthèse des débits aux dates de campagnes de terrain. Débits sources: calculés à partir des hydrogrammes du Rhône à Lagnieu, de l'Ain à Pont de Chazey et de la Bourbre à Tignieu Jameyzieu, avec le modèle hydraulique 1-D du Rhône développé par l'OSR..... 64

Annexe 6 : Synthèse des stocks locaux et totaux estimés pour chaque fraction granulométrique inférieure à 2 mm. Les noms de zones apparaissant en caractères gras correspondent aux zones des bancs prospectés..... 64

Classe granulométrique	Diamètre d (en mm)
Bloc	256 – 4096
Cailloux	64 – 256
Gravier	2 – 64
Sable	0,0625 - 2
Limon	0,00391
Argile	0,000244

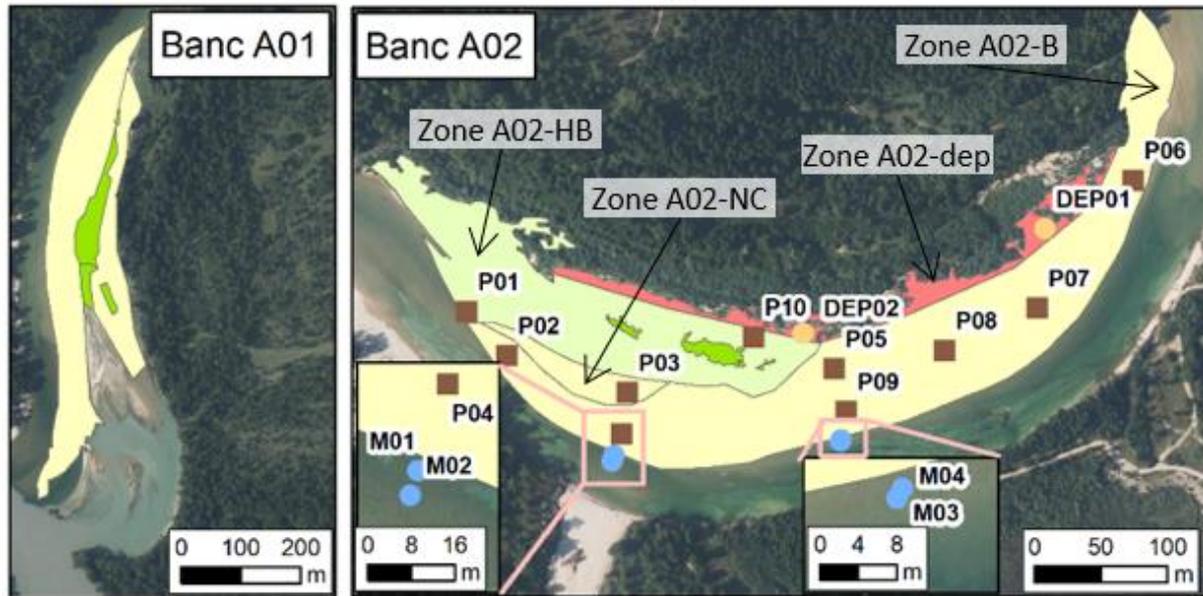
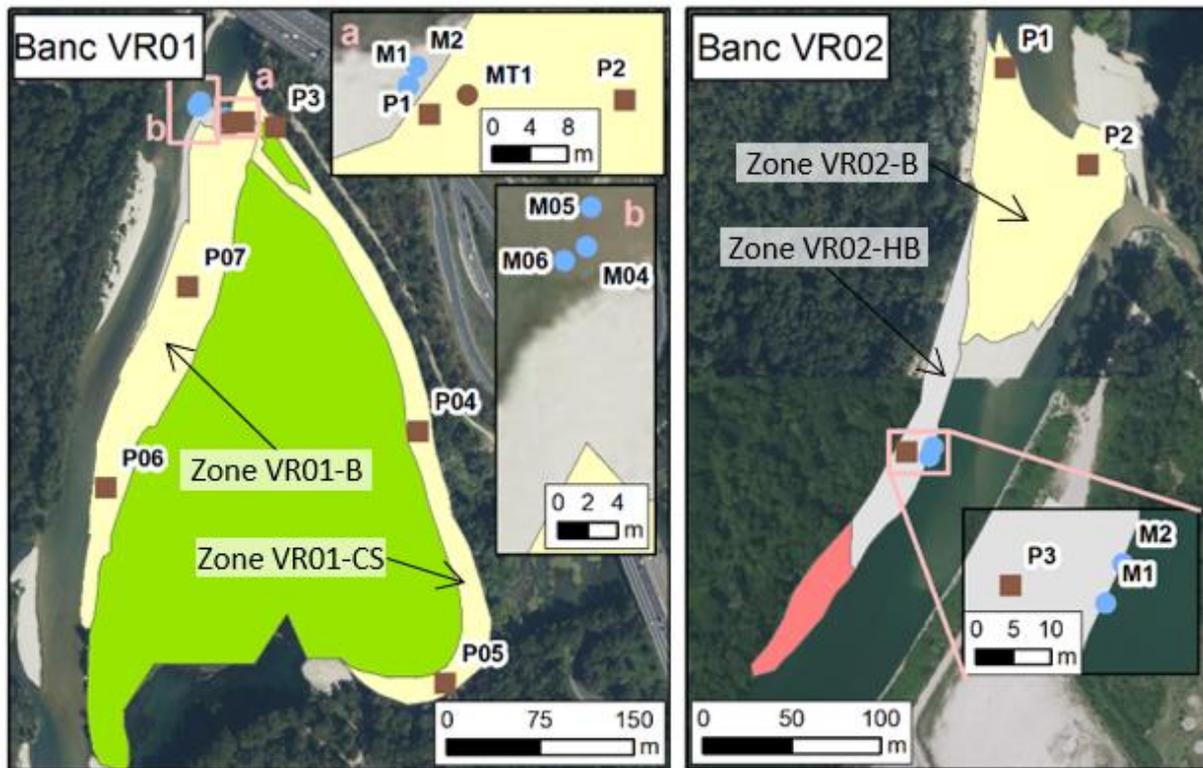
[Annexe 1 : Classification granulométrique de Wentworth, d'après Bunte & Abt \(2001b\)](#)



Annexe 2: Carte de l'Etat-major (1820-1866) annotée avec l'emplacement des limites de la zone d'étude. Source : IGN



Annexe 3 : Panneau cartographique présentant l'état de la prospection sur le secteur d'étude ainsi que le secteur « Canal de Miribel et seuil de Villeurbanne ». Fonds de carte : Image Sentinel 2 du 14 avril 2022 pour la carte générale ; BD Ortho de l'IGN pour les cartes localisées.



Ce panneau cartographique présente les cartes de chaque banc prospecté dans les secteurs « Vieux Rhône » et « Ain » afin de localiser les points de prélèvement.

Type de prélèvement :

- « McNeil » dans l'eau
- « McNeil » terrestre
- « placette »
- Dépôt

- Faciès armuré
- Faciès mixte
- Faciès de dépôt
- Végétation basse
- Végétation

Annexe 4 : Panneau cartographique des secteurs « Vieux Rhône » et « Ain ». Fonds de carte : BD Ortho de l'IGN.

Débits lors des campagnes de terrain										
Station										
Date	Secteur	Cours d'eau	Nom	X (lambert93)	Y (lambert93)	Z	Débit moyen entre 9h et 16h (m3/s)	Commentaires		
04/03/2022	VR	Vieux Rhône	Rhône_Jons	861967,73	6525726,26	186	506			
15/03/2022	SV	Rhône	Rhône_Jons	861967,73	6525726,26	186	360,5			
24/03/2022	VR	Vieux Rhône	Rhône_Jons	861967,73	6525726,26	186	273			
07/04/2022	Mi	Canal de Miribel	Rhône_Jons	861967,73	6525726,26	186	649,5	Attention, jour de pluie, fluctuation importante du débit		
14/04/2022	VR	Vieux Rhône	Rhône_Jons	861967,73	6525726,26	186	500			
22/04/2022	Mi	Canal de Miribel	Rhône_Jons	861967,73	6525726,26	186	382			
28/04/2022	Mi	Canal de Miribel	Rhône_Jons	861967,73	6525726,26	186	370			
03/05/2022	Mi	Canal de Miribel	Rhône_Jons	861967,73	6525726,26	186	280			
10/05/2022	Mi	Canal de Miribel	Rhône_Jons	861967,73	6525726,26	186	322,5	La constance du débit est étonnante car il y a eu un lâcher de barrage ce jour, dans la matinée		
17/05/2022	A	Ain	Port_Galland	871860,69	6526475,283	183	17			
24/05/2022	A	Ain	Port_Galland	871860,69	6526475,283	183	16			
09/06/2022	A	Ain	Port_Galland	871860,69	6526475,283	183	19,5			
14/04/2022	Ain	date de l'image Sentinel 2 utilisée pour la digitalisation des bancs non prospectés					64			

Annexe 5 : Synthèse des débits aux dates de campagnes de terrain. Débits sources: calculés à partir des hydrogrammes du Rhône à Lagnieu, de l'Ain à Pont de Chazey et de la Bourbre à Tignieu Jameyzieu, avec le modèle hydraulique 1-D du Rhône développé par l'OSR.

Zone homogène	Aire de la zone homogène (en m ²)	< 100 µm		100 - 500 µm		0,5 - 2 mm		0,1 - 2 mm		
		Stock moyen en surface (en kg.m ⁻²)	Stock moyen en sub-surface (en kg.m ⁻³)	Stock moyen en surface (en kg.m ⁻²)	Stock moyen en sub-surface (en kg.m ⁻³)	Stock moyen en surface (en kg.m ⁻²)	Stock moyen en sub-surface (en kg.m ⁻³)	Stock (surface) en tonnes	Stock (sub-surface) en tonnes	Stock total (masse en t)
A02-B	33672	0,39	2,45	5,75	37,36	3,59	44,34	314	21	335
A02-HB	17574	0,12	4,95	5,09	54,24	0,95	92,97	106	18	124
A02-NC	2281	0,02	1,74	11,49	1,02	4,64	0,18	37	0	37
ANP01	8093	0,39	2,45	5,75	37,36	3,59	44,34	76	7	82
ANP02	5552	0,39	2,45	5,75	37,36	3,59	44,34	52	2	54
ANP03	1954	0,39	2,45	5,75	37,36	3,59	44,34	18	0	19
A01-B	44499	0,39	2,45	5,75	37,36	3,59	44,34	416	4	419
A01-CS	16462	0,39	2,45	5,75	37,36	3,59	44,34	154	1	155
ANP04	6187	0,39	2,45	5,75	37,36	3,59	44,34	58	5	63
MI13	6905	0,07	9,16	0,48	41,65	4,54	266,16	35	27	62
MI12	4575	0,07	9,16	0,48	41,65	4,54	266,16	23	21	44
MI11	2729	0,07	9,16	0,48	41,65	4,54	266,16	14	12	26
MI10	22575	0,02	13,12	0,04	43,08	0,07	68,38	2	33	35
MI09-B	3132	0,04	3,02	0,91	16,51	5,38	110,17	20	3	22
MI09-HB	0	0,06	5,92	1,46	32,04	2,34	213,69	13	6	20
MI08	5061	0,04	3,02	0,91	16,51	5,38	110,17	32	6	38
MI07	5223	0,04	3,02	0,91	16,51	5,38	110,17	33	8	41
MI05	8823	0,06	4,96	0,01	4,83	0,91	142,69	8	19	28
MI04	17622	0,06	4,96	0,01	4,83	0,91	142,69	16	38	54
MI03	0	0,08	11,26	0,04	37,51	0,05	74,52	0	9	9
MI02	1993	0,08	11,26	0,04	37,51	0,05	74,52	0	3	3
MI01	1014	0,08	11,26	0,04	37,51	0,05	74,52	0	2	2
VR01-B	15726	0,20	3,72	1,54	43,71	0,83	21,47	37	4	41
VR01-CS	10635	0,40	9,09	3,41	170,01	1,38	54,49	51	8	59
VR02-B	9342	0,11	4,52	0,01	0,88	0,00	0,14	0	0	0
VR02-HB	2911	1,62	9,41	15,41	93,24	0,68	5,97	47	3	50
SV	21804	0,16	13,14	1,38	66,03	0,34	13,65	38	3	41
SVNP01	2020	0,16	13,14	1,38	66,03	0,34	13,65	3	0	4
Total (en t)			83		1019		847	1603	264	1867

Annexe 6 : Synthèse des stocks locaux et totaux estimés pour chaque fraction granulométrique inférieure à 2 mm. Les noms de zones apparaissant en caractères gras correspondent aux zones des bancs prospectés.