



HAL
open science

Synthèse des mesures hydro-sédimentaires lors de la chasse de la Basse-Isère de janvier 2021

B Camenen, G Dramais, M Bouche, J Stepanian, F Lauters, S Reynaud, S
Menu, G Pierrefeu, J Le Coz, J Laible, et al.

► **To cite this version:**

B Camenen, G Dramais, M Bouche, J Stepanian, F Lauters, et al.. Synthèse des mesures hydro-sédimentaires lors de la chasse de la Basse-Isère de janvier 2021. INRAE RiverLy; EDF; CNR. 2021. hal-03948261

HAL Id: hal-03948261

<https://hal.inrae.fr/hal-03948261>

Submitted on 20 Jan 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.

INRAE

CNR



Synthèse des mesures hydro-sédimentaires lors de la chasse de la Basse-Isère de janvier 2021

B. Camenen¹, G. Dramais¹, M. Bouche², J. Stepanian¹,
F. Lauters², S. Reynaud³, S. Menu², G. Pierrefeu³,
J. Le Coz¹, J. Laible¹, F. Thollet¹, A. Bonnefoy¹,
M. Lagouy¹, T. Fretaud³ et P. Nunes³

¹ : INRAE, UR RiverLy, centre de Lyon-Grenoble, Villeurbanne, France

² : EDF-DTG, Saint-Martin-le-Vinoux, France

³ : CNR CACOH, Lyon, France

janvier 2022

Table des matières

1	Introduction	3
2	Mesures réalisées	4
2.1	Chronologie de l'évènement	4
2.2	Mesures hydro-sédimentaires	7
2.3	Mesures spécifiques pour l'estimation des flux de sable	8
2.4	Description des conditions de jaugeage solide et matériel mis en oeuvre à la traile de Beaumont-Monteux	9
2.5	Description des conditions de jaugeage solide et matériel mis en oeuvre au pont Vélo-Route	14
2.6	Analyse des échantillons	15
3	Estimations des flux de MES	17
3.1	Turbidité et MES le long de la Basse-Isère jusqu'au Rhône	17
3.1.1	Basse-Isère	17
3.1.2	Rhône à la confluence avec l'Isère	20
3.2	Flux de MES le long de la Basse-Isère jusqu'au Rhône	22
3.2.1	Basse-Isère	23
3.2.2	Rhône à la confluence avec l'Isère	25
4	Estimations des flux de sable	27
4.1	Méthodologie de mesure des flux mis en place	27
4.1.1	Jaugeage des flux charriés	27
4.1.2	Jaugeage de la suspension sableuse	27
4.2	Mesure des flux de sable en suspension sur le tronçon aval de l'Isère	29
4.2.1	Barrage de Beaumont-Monteux	29
4.2.2	Traile de Beaumont-Monteux	33
4.2.3	Pont Vélo-Route	35
4.3	Granulométrie des sables	39
4.3.1	Mesure de la distribution granulométrique des sables	39

4.3.2	Évolution de la distribution granulométrique des sables	40
4.3.3	Gradients de sable sur la verticale	42
4.4	Modélisation simplifiée de la capacité de transport	43
4.4.1	Présentation du modèle	43
4.4.2	Application à la station de Beaumont-Monteux	45
4.4.3	Application à la section du Pont Vélo-Route	48
5	Évolutions bathymétriques et bilans sédimentaires	53
5.1	Évolutions bathymétriques dans les retenues de la Basse-Isère	53
5.2	Évolutions bathymétriques à la confluence Isère-Rhône	54
5.2.1	Aval Isère	54
5.2.2	Canal d'amenée	55
5.3	Bilan sédimentaire sur la chasse de 2021	56
5.3.1	Bilan global	56
5.3.2	Évolution temporelle du dépôt	58
6	Conclusion	60
6.1	Bilan des mesures	60
6.2	Bilan de la dynamique sédimentaire	62
6.3	Perspectives	63
A	Graphiques complémentaires	68
A.1	Mesures ADCP	68
A.2	Représentation spatiale des mesures à la traille de Beaumont-Monteux	70
A.2.1	Concentrations mesurées avec la US-P72	70
A.2.2	Flux mesurés avec la bouteille de Delft	79
A.3	Représentation spatiale des mesures au pont Vélo-Route	82
A.4	Graphiques avec échelle linéaire	87

Chapitre 1

Introduction

Dans le cadre d'une collaboration entre les partenaires CNR / EDF / INRAE et dans le cadre de l'Observatoire des sédiments du Rhône (OSR), un suivi des flux sédimentaires apportés par la Basse-Isère au Rhône lors des chasses de la Basse-Isère est mis en place en se focalisant tout particulièrement sur les flux de sable et leur potentielle sédimentation à la confluence entre l'Isère et le Rhône.

Ce rapport présente l'ensemble des résultats obtenus suite à la campagne de mesure réalisée lors de la chasse de janvier-février 2021.

Il complète les rapports sur les chasses de 2008 et 2015 ([Naudet et al. 2016, 2017](#)) ainsi que l'article qui a suivi ([Camenen et al. 2019](#)).

Chapitre 2

Mesures réalisées

Les différents sites de mesure sont présentés Fig. 2.1. Nous pouvons distinguer tout particulièrement les stations hydro-sédimentaires sur le domaine EDF (Tullins, Fauries, Beaumont-Monteux), des points de réglages (PR1 et PR2) et la station hydrométrique de Beaumont-Monteux gérés par CNR, des sites de mesure ponctuelle commun à CNR-EDF-INRAE (sur le domaine CNR : trailla de Beaumont-Monteux, pont Vélo-Route) auquel on peut rajouter des sites de mesures EDF (sur le domaine EDF : barrage de Beaumont-Monteux, et sur le domaine CNR : points de référence R1, R2 et R3).

2.1 Chronologie de l'évènement

La Figure 2.2 présente la chronique des débits Q mesurés à Beaumont-Monteux avec une délimitation des phases de l'évènement : la chasse du 29 janvier à 20h au 2 février à 6h30 (correspondant ici à la période où le barrage de La Vanelle est ouvert jusqu'au début du remplissage de la retenue de Beauvoir), et la période de remplissage du 2 février à 6h30 au 12 février 15h (se terminant à la fin du remplissage de la retenue de Beaumont-Monteux). Contrairement aux précédentes chasses, la chasse de 2021 a été déclenchée dès la montée des débits ; on ne peut donc pas parler d'une période de crue. Il est aussi à noter que les valeurs de débit présentées ici sont brutes et ne prennent donc pas en compte un possible détarage de la station lié aux dépôts à la confluence. Le pic de crue sur l'Isère reste relativement faible ($Q_{max} = 900 \text{ m}^3/\text{s}$) en particulier par rapport à la crue de 2015 ($Q_{max} = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$).

Pour indication, le Tableau 2.1 précise les dates d'ouverture et remplissage des différents ouvrages de la Basse-Isère. Il est à noter que du fait d'un incident au niveau des vannes du barrage de Beaumont-Monteux, la période de remplissage pour ce dernier a eu lieu le 12 février 2021. La Figure 2.3

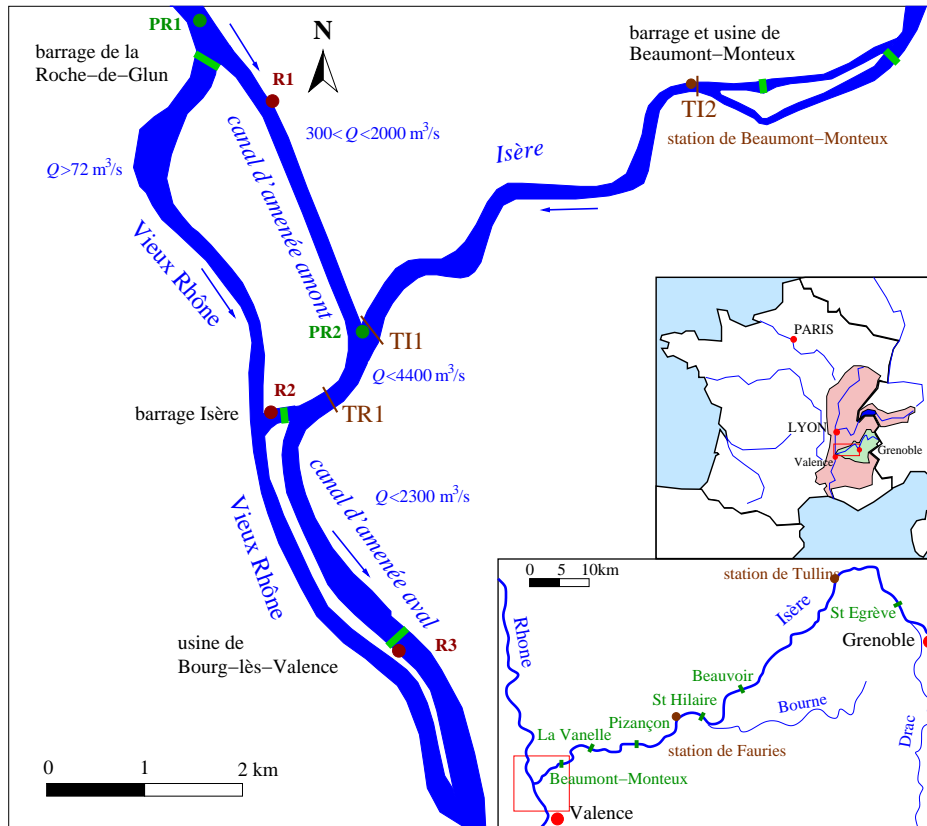


FIGURE 2.1 – Localisation des sites de mesure sur la Basse-Isère.

présente les cotes des différentes retenues sur cette période pour illustrer le Tableau 2.1.

TABLE 2.1 – Chronologie de la gestion des barrages de la Basse-Isère lors de la chasse de 2021 (heure en TU+1).

Barrage	Date début de chasse	Date fin de chasse	Date début de remplissage	Date fin de remplissage
Beaumont-Monteux	30/01/2021 23h30	31/01/2021 12h00	12/02/2021 05h45	12/02/2021 15h00
La-Vanelle	29/01/2021 20h00	30/01/2021 03h00	03/02/2021 09h05	03/02/2021 19h00
Pizançon	30/01/2021 06h00	30/01/2021 22h20	02/02/2021 16h30	03/02/2021 08h00
Saint-Hilaire	31/01/2021 14h45	01/02/2021 03h00	04/02/2021 08h30	04/02/2021 20h00
Beauvoir	01/02/2021 20h00	02/02/2021 06h00	02/02/2021 07h00	02/02/2021 14h00

La Figure 2.4a indique les débits mesurés à St Gervais (en aval de Tullins), au pont de Mannes sur la Bourne (principal affluent intermédiaire de la Basse-

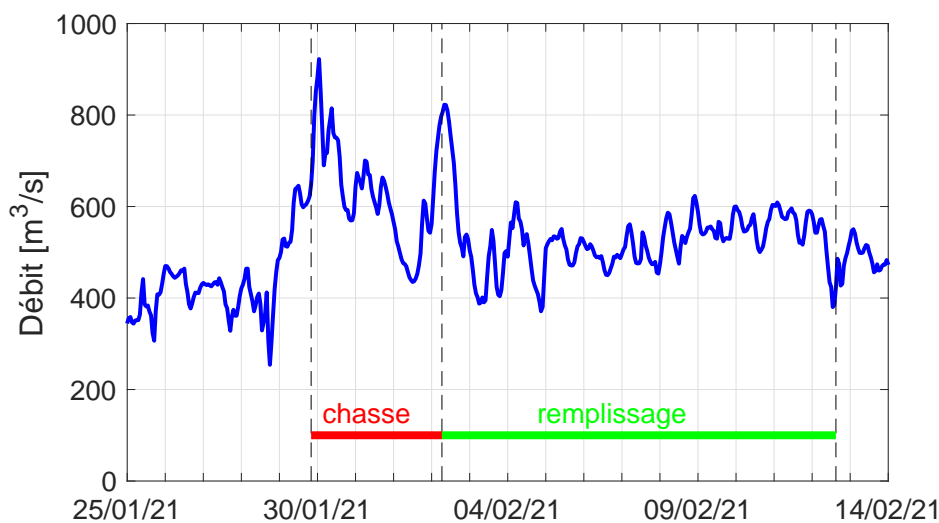


FIGURE 2.2 – Chronologie de l'évènement de crue/chasse de la Basse-Isère début 2021 (débits bruts CNR issus de la station de Beaumont-Monteux).

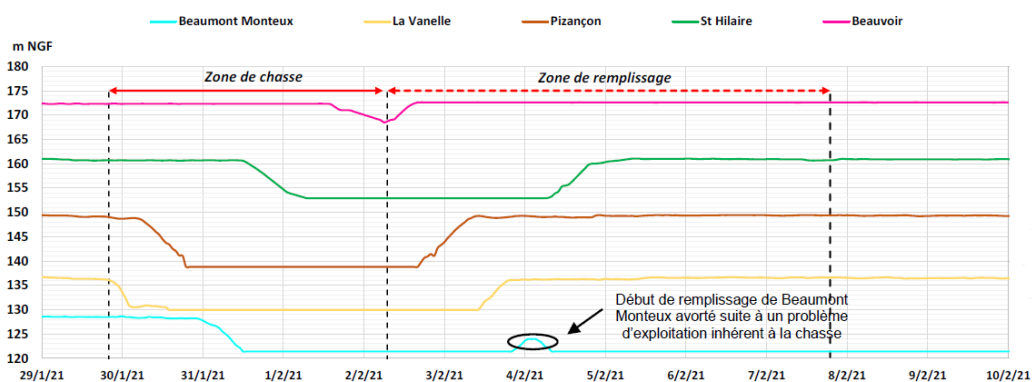


FIGURE 2.3 – Chronique des cotes des différentes retenues EDF de la Basse-Isère.

Isère) et à Beaumont-Monteux. La somme des débits de l'Isère à St Gervais et de la Bourne correspond globalement au débit mesuré à Beaumont-Monteux modulo les effets liés à la gestion des barrages. De manière similaire sont donnés les débits estimés aux barrages Isère et de Bourg-lès-Valence dans la Figure 2.4b. On peut noter que le barrage Isère a été ouvert avant même l'arrivée de la crue/chasse de l'Isère dès le 25 janvier (des ouvertures ont en fait eu lieu ponctuellement depuis le 20 janvier). Concernant le barrage de Bourg-lès-Valence, on pourra noter un débit quasi-constant sur l'ensemble de la période autour de $Q = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$.

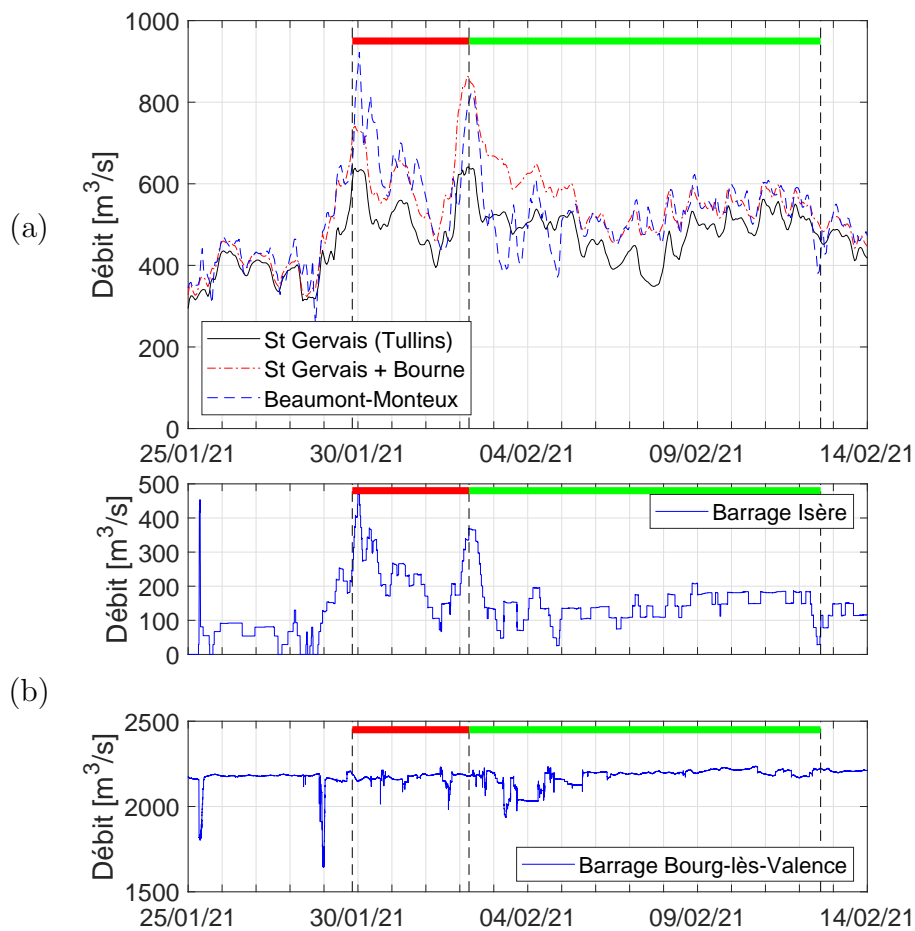


FIGURE 2.4 – Chroniques de débit sur la Basse-Isère et sur le Rhône à la confluence.

2.2 Mesures hydro-sédimentaires

Concernant les stations hydro-sédimentaires, sont disponibles les débits et les concentrations après conversion de la turbidité en concentration en Matière en Suspension (MES) via une courbe de conversion établie à partir d'échantillons prélevés à l'aide de préleveurs automatiques de type ISCO. Il est à noter que quelques mesures ponctuelles de concentration via des prélèvements manuels au seau ont été aussi réalisées par des équipes d'EDF en aval des barrages de Beauvoir et Pizanon (encart Fig. 2.1).

Sur chacun des points de référence sont disponibles les débits et quelques mesures de concentration et de la granulométrie de la suspension via des prélèvements au seau. Les points de référence R1, R2, et R3 correspondent à des sites clés sur le Rhône pour évaluer les flux de MES amont et aval à la

confluence avec l'Isère. Les débits sont estimés selon les méthodes suivantes :

- R1 : débit sortant aménagement de St Vallier (loi ouvrage) moins débit barrage Roche de Glun (loi ouvrage) ;
- R2 : débit barrage Isère (loi d'ouvrage) ;
- R3 : débit aménagement de Bourg-lès-Valence(loi d'ouvrage) ;

Les ouvrages sur la confluence sont réglés afin de respecter les critères de niveau pour les points de réglages (niveau d'eau) PR1 et PR2 ainsi que les conditions de débit dans le canal d'amenée :

- canal amont : $300 \leq Q \leq 2000 \text{ m}^3/\text{s}$;
- canal commun : $Q \leq 4400 \text{ m}^3/\text{s}$;
- canal aval : $Q \leq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$;

2.3 Mesures spécifiques pour l'estimation des flux de sable

Des mesures plus spécifiques pour évaluer les flux de sables ont été entreprises au niveau du barrage de Beaumont-Monteux, de la traille de Beaumont-Monteux (section TI2 Fig. 2.1), ainsi qu'au pont Vélo-Route juste en amont de la confluence (section TI1 Fig. 2.1).

Au niveau du barrage de Beaumont-Monteux, une pompe prélevant directement à la sortie des vannes a permis d'estimer les concentrations en sable sur de grands volumes de prélèvement.

A la station de Beaumont-Monteux, outre les mesures en berge (niveau d'eau, turbidité, prélèvement avec un préleveur automatique), plusieurs explorations des concentrations sur la section ont été réalisées à partir de la traille avec le préleveur US-P72 (Fig. 2.5c) et une bouteille de Delft (Fig. 2.5d). Quelques mesures de charriage ont aussi été tentées avec un préleveur de type Helley-Smith (Fig. 2.5b). Ces explorations ont été combinées avec des mesures ADCP (Fig. 2.5a) ainsi que des mesures acoustiques (UBMES, Ubertone).

Enfin, des mesures similaires ont été réalisées au niveau du pont Vélo-Route, soit plusieurs explorations des concentrations sur la section et du charriage à partir d'un camion jaugeur (Fig. 2.6a) depuis le pont avec une bouteille de Delft et un préleveur Helley-Smith, respectivement ainsi que des mesures ADCP et acoustiques (UBMES). A titre de comparaison, des prélèvements d'eau ont aussi été réalisés à partir d'un pompage (Fig. 2.6b) et au seau (surface). Des profils bathymétriques ont aussi été obtenus à l'aide du saumon du camion-grue.

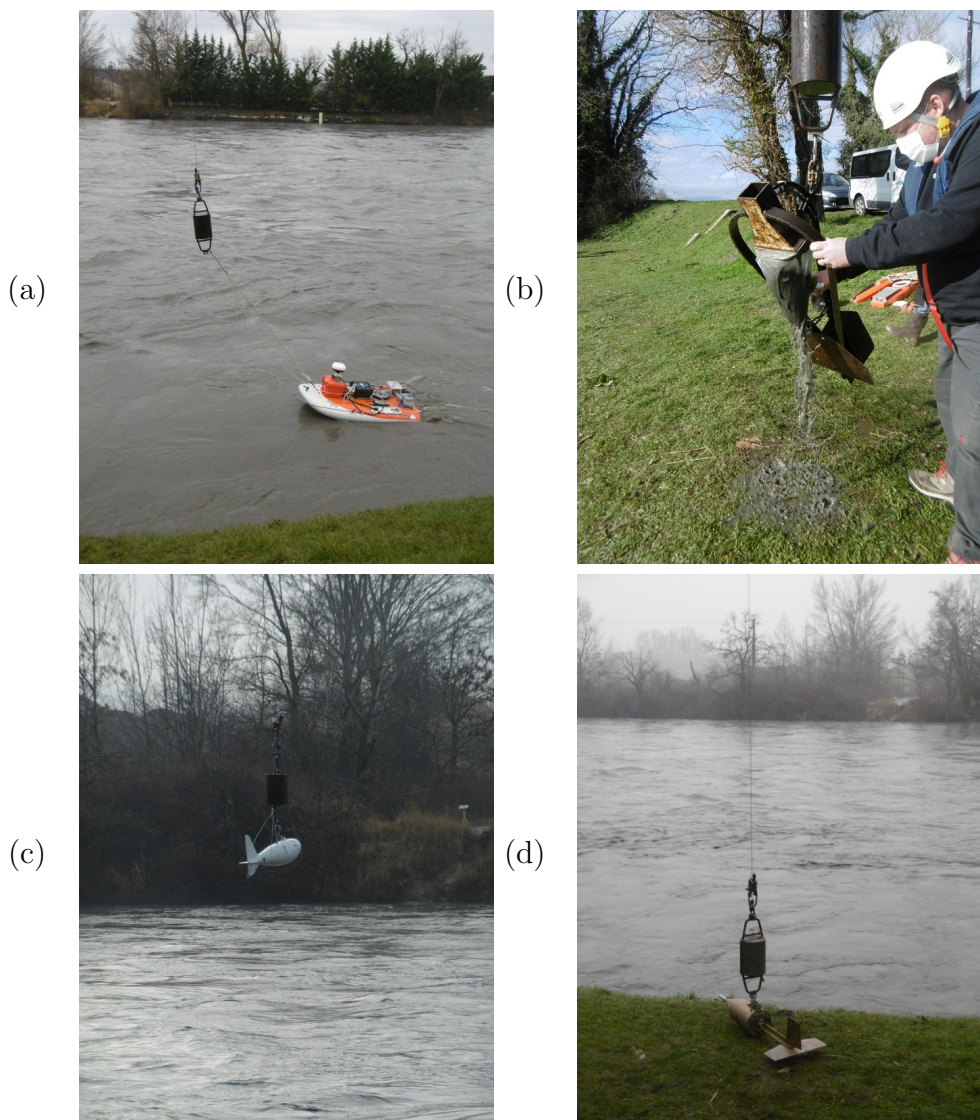


FIGURE 2.5 – Appareils de mesure déployés sur la trille de Beaumont-Monteux : (a) ADCP, (b) Helley-Smith, (c) P72 et (d) bouteille de Delft.

2.4 Description des conditions de jaugeage solide et matériel mis en oeuvre à la trille de Beaumont-Monteux

Les mesures ont commencé le 29/01/2021 à la trille de Beaumont Monteux. Des jaugeages à l'ADCP Riverray 600 kHz ont été effectués, le débit est cohérent avec la courbe de tarage et permet une première mesure de la

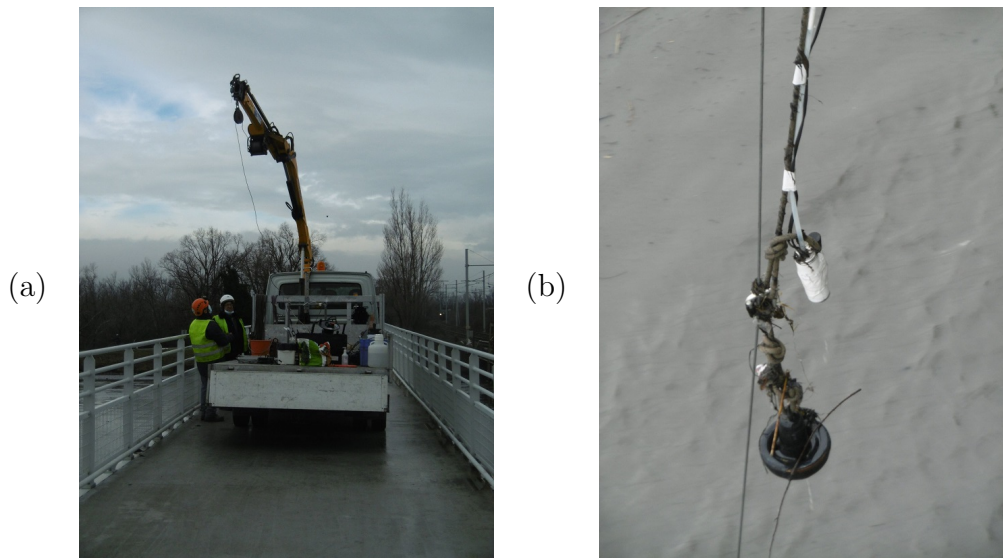


FIGURE 2.6 – Appareils de mesure déployés sur le pont Vélo-Route : (a) camion jaugeur, (b) pompe immergée .

bathymétrie sur le transect ainsi qu'un premier aperçu du champ de vitesse. Un jaugeage solide est réalisé avec la bouteille US P-72, déployée depuis la traille hydrométrique, ce préleveur n'est pas prévu pour une utilisation avec des vitesses aussi importantes que celles observées lors des différents jours de la chasse de la basse Isère (gamme optimale 0,3 à 1,5 m/s). De plus son poids (18,6 kg) ne lui permet pas de rester stable avec des vitesses fortes comme observé à Beaumont-Monteux (> 2 m/s). Une vérification a posteriori de l'isocinéticité montre que la bouteille présente des caractéristiques d'un prélèvement sub-isocinétique systématique de -26% en moyenne (ce jour-là), effectivement le remplissage attendu est inférieur à la théorie. La conséquence peut être une sur-concentration des échantillons.

Le 30/01/2021, on observe une arrivée massive de fines (plusieurs grammes par litre 2,5 à 6 g/L) un peu moins de sable (0,5 g/L) à partir du début d'après-midi. Un nouveau jaugeage solide est entrepris et confirme une des limites de la bouteille US-P72 : son poids est trop faible pour tenir dans l'écoulement, l'ajout d'un poids de 25 kg améliore la stabilité mais la trainée reste encore importante. La vérification a posteriori de l'isocinéticité montre un comportement erratique, sub-isocinétique ou super-isocinétique suivant les échantillons (cf. Fig. 2.7), ceci améliore la moyenne d'efficacité du préleveur ($\approx 5\%$) mais ne rend pas compte de la réelle difficulté de mesure.

Le 31/01/2021, les conditions deviennent très chargées avec beaucoup de débris organiques (feuilles en particulier). MES et sables arrivent en quan-

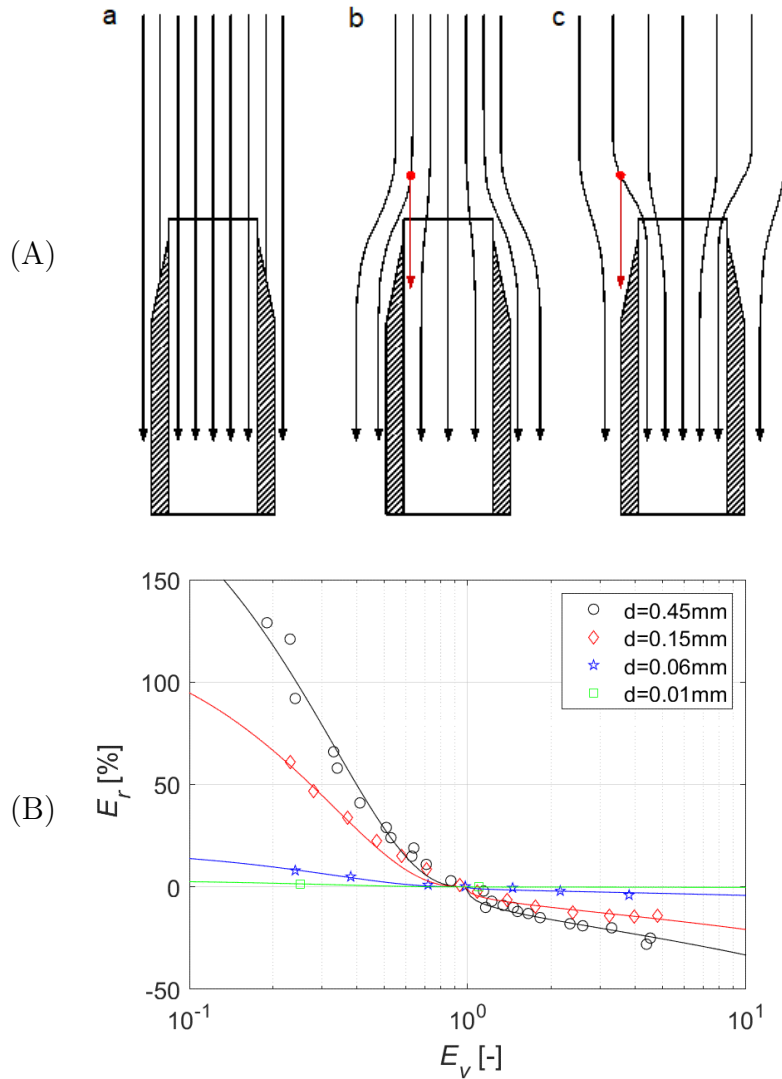


FIGURE 2.7 – Influence de la vitesse de prélèvement sur la concentration en se focalisant tout particulièrement sur les lignes de courant (A) ; (a) prélèvement isocinétique, (b) prélèvement avec $V_p < V$, (c) prélèvement avec $V_p > V$ (modifié depuis [Gray & Gartner 2009](#)) et conséquence sur l'erreur de prélèvement E_r selon la granulométrie et le rapport entre la vitesse de prélèvement et la vitesse de l'écoulement E_v (B) ([Camenen et al. 2021](#), [FISP \(Federal Interagency Sedimentation Project\) 1941](#)).

tités très importantes. La buse du préleveur se bouche systématiquement, l'équipe de mesure décide alors d'enlever la buse du préleveur US-P72. C'est dans ce mode dégradé que toutes les mesures seront prises par la suite. Le temps d'exposition est augmenté. Les signaux ADCP ne passent plus, trop

atténués par les sédiments en suspension et trop chahutés par les conditions turbulentes en surface. Ces conditions de mesure très difficiles et ces prélèvements en mode dégradé vont tout de même pouvoir nous apporter des informations très importantes sur la répartition des sédiments dans la section et sur la dynamique du sable. En l'absence de bathymétrie (ADCP) ce jour-là, la bathymétrie du 30/01 est utilisée pour la représentation spatiale des données de concentration. La même approximation est effectuée pour vérifier les performances sur l'isocinéticité du préleveur. Le volume prélevé est très inférieur au volume théorique attendu mais l'absence de buse rend le calcul très incertain. La représentation spatiale des concentrations est assez cohérente même si aucun gradient de concentration marqué n'est observé.

Le 01/02/2021, l'ADCP n'est pas en mesure de donner des résultats exploitables, l'écoulement est toujours très chargé en sable et en fines, on atteint les concentrations maximales de l'évènement. Deux jaugeages solides sont réalisés avec la bouteille US-P72, on remarque une tendance à la baisse des concentrations en fines lors du second jaugeage solide. Les profondeurs des échantillons sont corrigées avec les données du capteur Diver pour la campagne de l'après-midi. La bouteille de Delft est également utilisée pour effectuer un jaugeage solide. Depuis la traille, la bouteille est déployée avec son empennage mais sans la structure de dépose (cf. Fig. 2.8(a)).

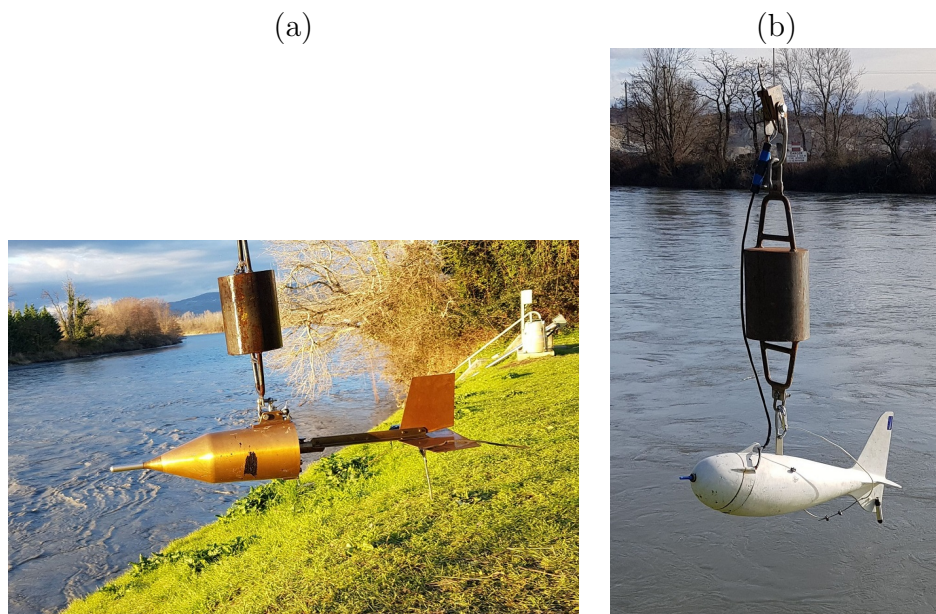


FIGURE 2.8 – Déploiement de la bouteille de Delft (a) et de la US-P72 (b) à Beaumont-Monteux.

La petite buse droite est utilisée (diamètre 1.55 cm) avec un temps d'ex-

position de 5 minutes. D'importantes quantités de sable sont récoltées (200 à 300 grammes de sable par échantillon) sur les deux verticales explorées, on observe un gradient marqué vers le fond. Le d_{50} du sable en suspension récolté a une granulométrie moyenne de $110 \mu\text{m}$.

Le 02/02/2021, les tentatives de mesure ADCP avec un 300 kHz ne sont pas concluantes. Une correction de trainée est affectée aux profondeurs de prélèvement. La baisse de concentration en fines se confirme, la concentration en sable baisse également mais reste forte. Pour la première fois de l'évènement la concentration en sable est supérieure à la concentration en fines dans les échantillons. Le jaugeage à la bouteille de Delft montre une répartition des flux moins organisée que la veille. Le d_{50} du sable en suspension récolté a une valeur moyenne de $135 \mu\text{m}$.

Le 03/02/2021, pas de mesure ADCP concluante ce jour-là, les conditions de prélèvement sont aussi assez compliquées avec une maintenance de la bouteille US-P72. Cependant un jaugeage solide est réalisé, on observe une forte baisse des concentrations d'un facteur ≈ 5 par rapport à la veille. Les concentrations deviennent inférieures à 1 g/L pour les fines mais toujours supérieure à 1 g/L pour les sables. Cette diminution du flux est confirmée par la bouteille de Delft même si les flux semblent moins organisés sur la verticale. Le d_{50} du sable en suspension récolté a une valeur moyenne de $175 \mu\text{m}$.

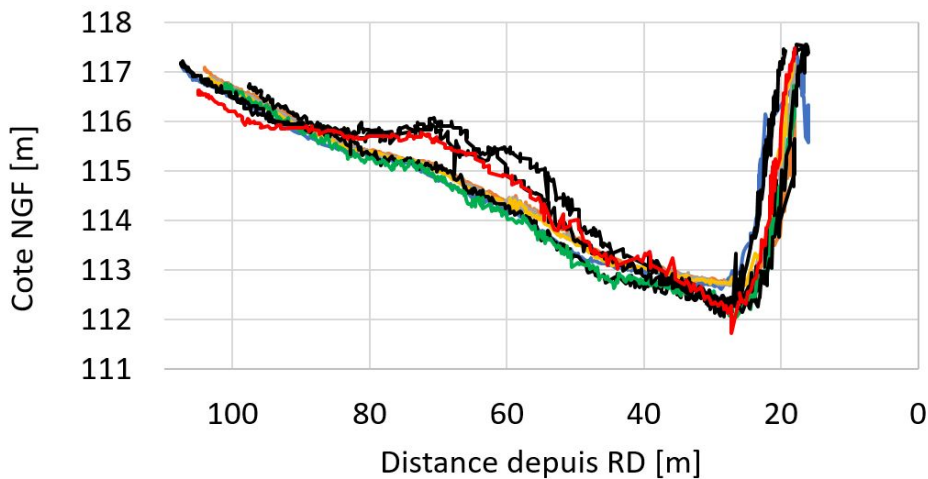


FIGURE 2.9 – Evolution de la bathymétrie à Beaumont-Monteux mesurée avec l'ADCP.

Le 04/02/2021, mesures ADCP effectuées avec un 300 kHz, nouvelle bathymétrie exploitable. Les profondeurs des échantillons ici sont corrigées avec les données du capteur Diver. Il semble que la section se soit réduite depuis le

début de l'évènement avec un dépôt important (cf. Fig. 2.9). Une seule verticale est mesurée avec la bouteille US-P72, la concentration en sable reste aussi importante que la veille (> 1 g/L). Un nouveau jaugeage à la bouteille de Delft est réalisé, le d_{50} du sable en suspension récolté a une valeur moyenne de $260 \mu\text{m}$ ce qui est le plus fort d_{50} depuis le début de l'évènement. Le fait d'avoir le champ de vitesse via l'ADCP et des mesures de granulométrie distribuées pourrait nous permettre d'affiner le calcul de flux en évaluant précisément le coefficient de correction pour les mesures à la bouteille de Delft α établi par (Dijkman 1981, Dijkman & Milisic 1982). Cependant avec les valeurs retenues ($260 \mu\text{m}$ et une vitesse moyenne de 2 m/s), cela amènerait à un coefficient inférieur à 1 (Fig. 2.10), ce qui n'est pas cohérent avec les autres estimations de flux et les mesures de concentration.

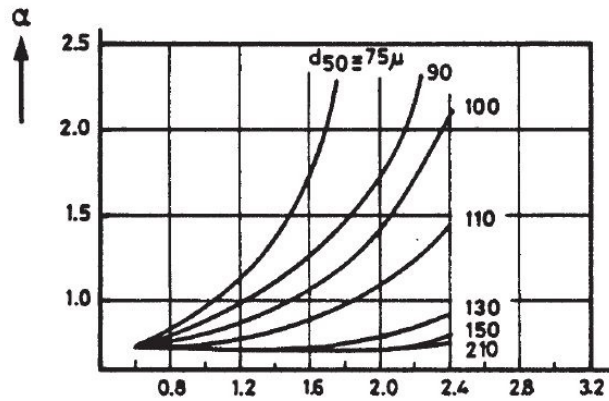


FIGURE 2.10 – Abaque sur le coefficient α pour le petit bec droit de la bouteille de Delft (Dijkman 1981).

Le 09/02/2021, un jaugeage à la bouteille de Delft est réalisé. A part en rive gauche où l'on a un profil constant, on observe des gradients marqués de sable même si les flux ont largement baissé. Le d_{50} moyen du sable en suspension diminue légèrement autour de $225 \mu\text{m}$.

2.5 Description des conditions de jaugeage solide et matériel mis en oeuvre au pont Vélo-Route

Les mesures commencent également le 29/01/2021 avec des transects ADCP, les vitesses sont beaucoup plus faibles qu'en amont. L'influence du pont sur le champ de vitesse est visible (cf. Fig. 2.11). Les jaugeages solides

de sable en suspension avec la bouteille de Delft commencent le 29/01/2021 et vont durer jusqu'au 09/02/2021. Le flux de sable augmente à partir du 31/01/2021 la majeure partie du flux va passer jusqu'au 3/02/2021. Le 03/02/2021, un jaugeage solide par pompage distribué donne des résultats intéressants avec des gradients verticaux plus marqués que ceux observés lors des jaugeages avec la bouteille de Delft, mais le flux de sable estimé est très inférieur au flux de la bouteille de Delft le même jour. Ceci est surprenant sachant que la bouteille de Delft aurait elle-même tendance à sous-estimer le flux de sable au vu de la littérature (cf. Beverage & Williams 1989) et des jaugeages solides effectués à Beaumont Monteux. Il est cependant à noter que la vitesse de pompage a été très grossièrement adaptée à la vitesse de l'écoulement ; les prélèvements n'étaient donc pas iso-cinétiques. Ce jaugeage par pompage reste encourageant et le dispositif pourrait probablement être amélioré en profitant de l'expérience des équipes allemandes qui déploient ce genre de solutions sur le Rhin. A partir du 03/02/2021 la bathymétrie utilisée dans les figures de flux est celle du 03/02/2021. Le flux solide de sable en suspension diminue ensuite progressivement. Le flux de sable circule principalement dans les travées centrales T2 et T3 (cf. Fig. 2.11).

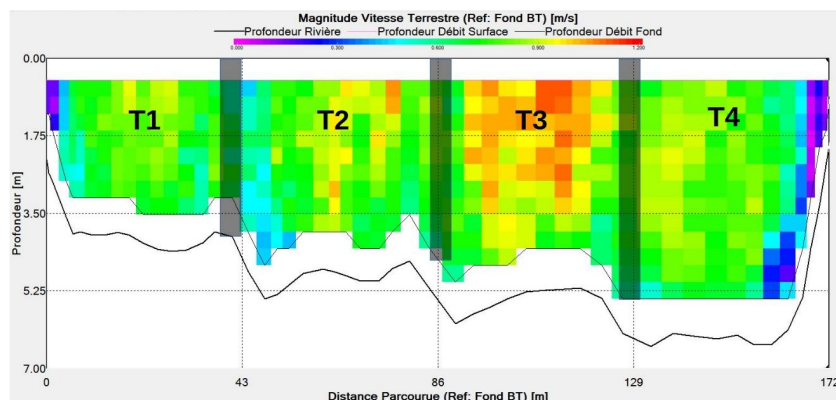


FIGURE 2.11 – Jaugeage ADCP réalisé à pont Vélo-Route le 29 janvier 2021 avec les piles de pont mises en évidence.

2.6 Analyse des échantillons

Au final, plus de 800 échantillons ont été récoltés ayant amené à plus de 2000 analyses effectuées suite à cette campagne de mesures.

Plusieurs types d'échantillons ont été traités suivant des protocoles pré-déterminés. La plupart des analyses ont été réalisées au laboratoire du HHlab de INRAE.

Concernant les échantillons liquides, les volumes issus des préleveurs ISCO, seau, US-P72 et pompage sont d'abord mesurés à l'aide de éprouvettes graduées puis ils subissent une séparation par tamisage à $63 \mu\text{m}$. Le refus du tamis est récolté sur un filtre puis pesé pour déterminer la concentration en sable. Le passant qui comporte les MES fines est filtré en totalité et permet d'obtenir la concentration en fines. Suivant l'expérience de l'opérateur et la composition de l'échantillon 12 à 15 échantillons par jour peuvent être analysés avec cette méthode. Il est à souligner que l'utilisation de filtres de gros diamètre permet d'optimiser les temps d'analyse.

Concernant les échantillons solides de la bouteille de Delft et du Helley-Smith, les échantillons sont séchés à l'étuve puis pesés. 30 échantillons par jour peuvent être analysés.

Le taux de matière organique des échantillons a été évalué pour un lot d'échantillon à 3 % par un protocole de perte au feu pour la suspension et 5 % pour les échantillons de charriage (Helley-Smith).

Les distributions granulométriques des sables sont mesurées à l'aide du granulomètre Malvern Mastersizer 3000 mis à disposition par l'ENTPE. Un sous-échantillon solide est préparé en enlevant les particules de diamètre supérieur à 1 mm puis les particules sont mises en suspension et analysées. Certains échantillons ont aussi été pris en photo avec un microscope Leica M205 C associé à une caméra Leica IC 80 HD (cf. Figure 4.9).

Chapitre 3

Estimations des flux de MES

3.1 Turbidité et MES le long de la Basse-Isère jusqu’au Rhône

La calibration des turbidimètres peut se faire assez simplement en faisant l’hypothèse d’une loi linéaire entre turbidité et concentration :

$$C = a_T T_u \quad (3.1)$$

où C et T_u sont les concentrations et turbidités exprimées en g/L et le coefficient de calage a_T est fonction de l’appareil de mesure et des caractéristiques des particules en suspension (essentiellement la taille mais aussi la densité, la couleur, etc.). Comme discuté dans [Camenen et al. \(2019\)](#), il serait possible d’affiner cette calibration grâce à la propriété additive de la turbidité ([Armi-jos et al. 2017](#)) en faisant l’hypothèse que la granulométrie des sédiments en MES peut être décomposée en un certain nombre de classes représentées par un diamètre constant mais avec une teneur variable.

3.1.1 Basse-Isère

Données de turbidité sur la Basse-Isère

La Figure [3.1](#) présente les données de turbidité acquises le long de la Basse-Isère. Ainsi, la station de Tullins indique une turbidité non influencée par la chasse car située à l’amont des ouvrages avec une relation concentration-turbidité telle que $a_T \approx 1$. Pour la station temporaire à l’aval de Beauvoir, le signal de turbidité augmente le 2 février vers minuit avec a_T passant de 1 à 3 environ. Ceci correspondrait à l’érosion de la retenue de Beauvoir même s’il existe un décalage avec la période de chasse (cf. [Tableau 2.1](#)). Le pic

d'érosion ne correspondrait donc pas exactement à la fin de l'abaissement des retenues. Pour la station de Fauries, nous observons un comportement similaire avec une forte augmentation de la turbidité et du coefficient entre concentration et turbidité (a_T variant de 1 à 2) du fait de l'érosion de la retenue de Saint-Hilaire, soit à partir du 31 janvier vers 16h. Encore une fois, il existe cependant un décalage avec la période de chasse officielle (cf. Tableau 2.1). Pour la station de Beaumont-Monteux, nous observons toujours ce même comportement. En début d'évènement où les concentrations sont plus faibles, le coefficient entre concentration et turbidité reste proche de 1 et dès que la chasse s'opère sur le barrage de Beaumont-Monteux, l'augmentation des concentrations est accompagnée par une augmentation du coefficient a_T à une valeur égale à 2 approximativement. Elle se fait en fin de journée du 30 janvier 2021 en concordance avec la mise en chasse officielle du barrage.

Il serait utile de savoir si ces variations sont liées à la présence de macroflocs (ou silts plus grossiers) et/ou de sable et/ou de matières organiques dans les échantillons prélevés avec l'ISCO en berge. Les prélèvements ont permis de confirmer la présence de sables (après tamisage à $63 \mu\text{m}$); des mesures in-situ restent nécessaires pour confirmer l'impact ou non sur la turbidité de la présence de floccs et matières organiques.

Pour l'estimation des flux, il semble donc important de faire varier le coefficient a_T dans le temps pour tenir compte des concentrations plus élevées observées pour une turbidité donnée lors des périodes de chasse des ouvrages.

Calibration de la turbidité à Beaumont-Monteux

Une calibration plus fine du turbidimètre de Beaumont-Monteux est proposée sur la période de la chasse. Il est à noter que ce calage ne correspond pas au calage officiel d'EDF même si les résultats sont a priori très proches (mêmes données de calage). La Figure 3.2a ainsi que le Tableau 3.1 donnent les valeurs du coefficient a_T en fonction de la phase de la chasse. On peut noter que le coefficient augmente rapidement lors de la période de chasse; tout d'abord à l'ouverture du barrage du Beaumont-Monteux ($a_T = 1.55$) puis lorsque tous les barrages sont ouverts et jusqu'à la période de remplissage comprise ($a_T = 2.20$). Lorsque tous les barrages sont fermés, les concentrations sont descendues à des valeurs inférieures à 0.5 g/L et a_T retrouve une valeur proche de la valeur initiale ($a_T = 1.20$).

Il est important de noter toutefois que ce calage temporel de la turbidité se base sur des mesures de concentration totale en berge (prélèvements en berge). Comme discuté au paragraphe 4.2.1, si l'on sépare les fines des sables dans l'analyse, le calage de la turbidité peut être très différent. On obtiendrait ainsi un coefficient proche de 1 dans le régime normal et montant à 1.2 lors

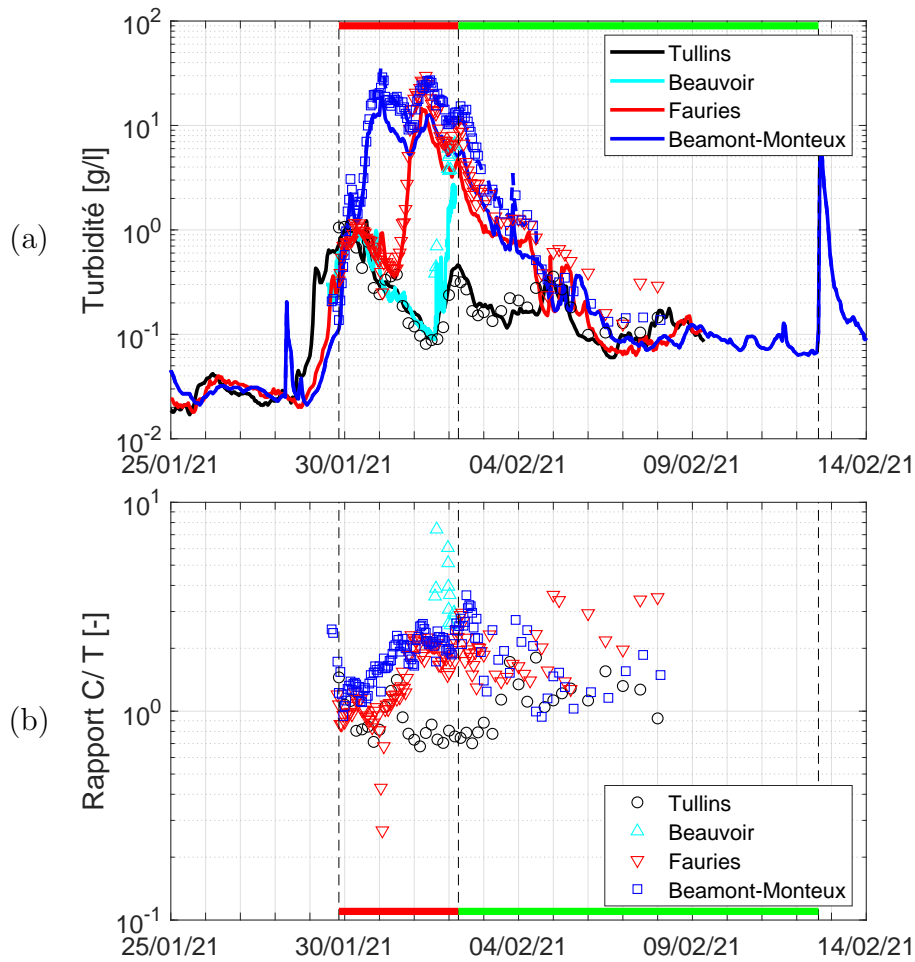


FIGURE 3.1 – Turbidité (unité constructeur assimilée ici au g/L) mesurée sur les principales stations de la Basse-Isère (a) et variations temporelles du rapport concentration sur turbidité (b).

de l'évènement de crue/chasse (Fig. 3.2b et Tab. 3.1).

La Figure 3.3 présente ainsi les courbes de concentration à la station de Beaumont-Monteux sur la base d'une mesure de turbidité calée avec les mesures de concentration totale ou de concentration en fine uniquement selon les valeurs de calage du Tableau 3.1. Les calages proposés (en distinguant 4 ou 2 périodes, respectivement) permettent un bon accord entre les estimations issues de la mesure de turbidité et les prélèvements que ce soit pour les concentrations totales ou pour les concentrations en fines. Les données issues des prélèvements avec le préleveur US-P72 sont cependant un peu plus dispersés (voir aussi Fig. 3.2b). Ces derniers étant prélevés à différentes positions au travers de la section et non pas à proximité du turbidimètre comme pour

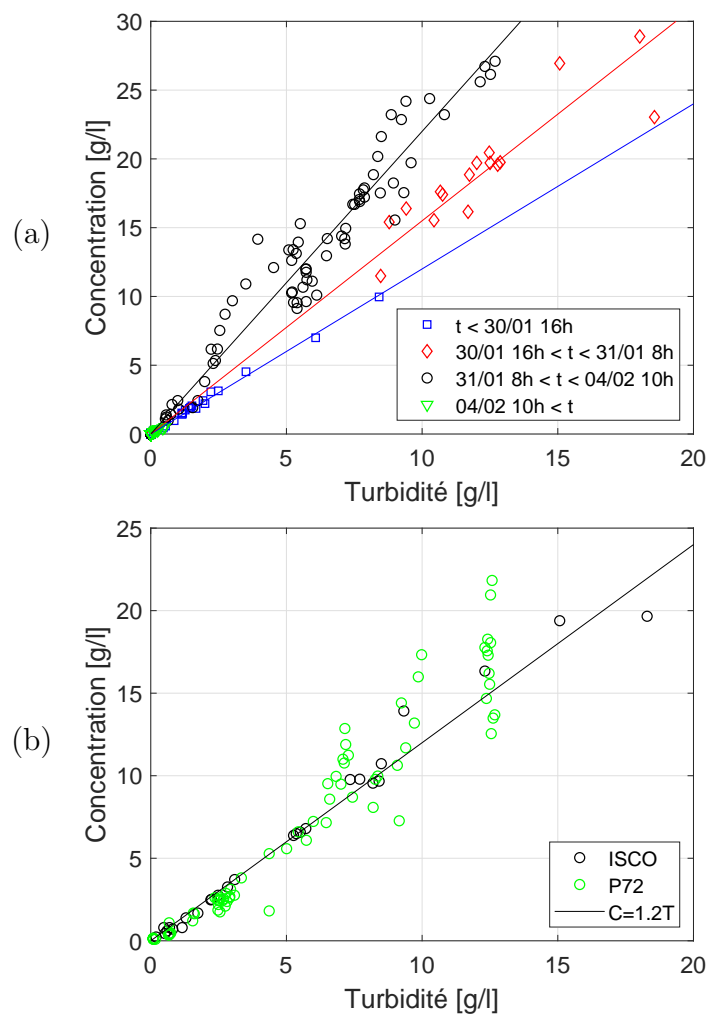


FIGURE 3.2 – Calage de la relation entre concentration totale (a) et concentration en fines uniquement (b) avec la turbidité pour la station de Beaumont-Monteux.

le préleveur ISCO, ceci indique que les concentrations en fines ne sont pas strictement homogènes sur la section de la station lors de la chasse.

3.1.2 Rhône à la confluence avec l'Isère

La Figure 3.4 présente les mesures de concentration réalisées ponctuellement (prélèvements au seau) sur le canal d'amenée (point R1), en aval du barrage Isère (point R2) et en aval du barrage de Bourg-lès-Valence (point R3). Il apparaît clairement que les apports amont du Rhône restent négligeables pendant la crue et la chasse avec des concentrations ne dépassant pas 0.4 g/L. Pour les points R2 et R3, nous retrouvons des valeurs assez

TABLE 3.1 – Calage temporel de la relation entre concentration et turbidité pour la station de Beaumont-Monteux.

Période	Date début	Date fin	a_T
concentration totale			
crue	-	30/01/2021 16h	1.20
chasse (1)	30/01/2021 16h	31/01/2021 08h	1.55
chasse (2)	31/01/2021 08h	04/02/2021 10h	2.20
post-chasse	04/02/2021 10h	-	1.20
concentration en fines ($d < 63 \mu m$)			
normal	-	-	1.00
crue/chasse	29/01/2021 20h	03/02/2021 08h	1.20

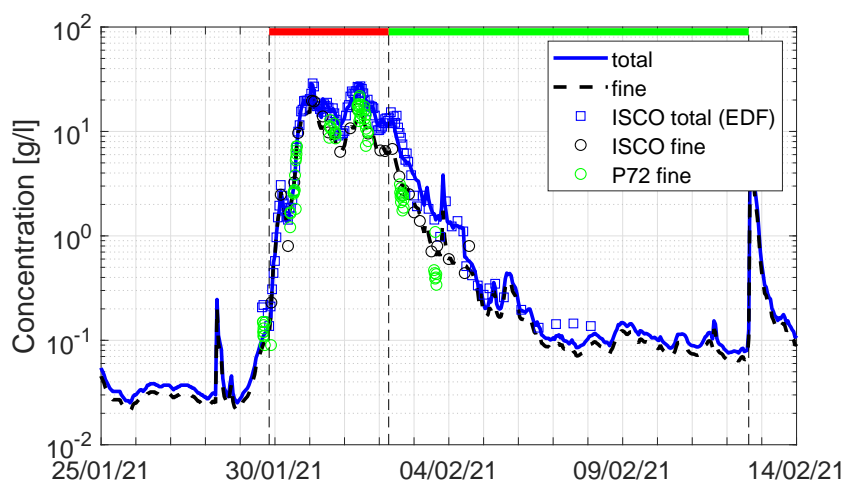


FIGURE 3.3 – Concentration totale et de fines à la station de Beaumont-Monteux.

similaires avec cependant des concentrations plus faibles en sortie du barrage Isère. Ceci peut s'expliquer par un mélange non atteint au barrage Isère et une influence plus forte du Rhône sur les concentrations. Quelques mesures en rive droite, au centre et en rive gauche ont permis de confirmer cette non-homogénéité. Pour la chasse de 2015, les mesures avaient montré que l'eau de l'Isère, du fait d'une température plus faible et des concentrations plus élevées, passait sous l'eau du Rhône pouvant induire des concentrations très élevées au niveau du barrage Isère. Ceci n'est pas vérifié pour la chasse de 2021.

Une analyse de doublons réalisés lors des mesures au barrages Isère (R2) et de Bourg-lès-Valence (R3) a été faite afin de séparer sables et fines. A titre de comparaison, nous avons présenté les concentrations totales mesurées directement (mesures EDF) avec la somme des concentrations en fines

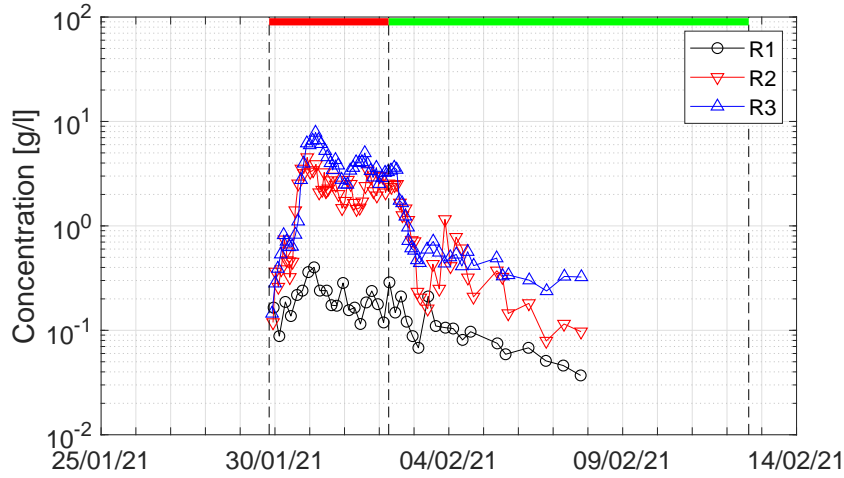


FIGURE 3.4 – Concentrations mesurées sur les points de référence R1, R2 et R3 sur le Rhône.

et en sables (mesures INRAE). Les résultats sont présentés Figure 3.5. Nous pouvons nous apercevoir que globalement, les concentrations en sable sont plus corrélées au débit (relativement stable sur le Rhône, cf. Fig. 2.4) qu'aux concentrations en MES issues de l'Isère, avec un pic beaucoup moins prononcé sur la période de la chasse. Concernant les prélèvements au barrage Isère, il existe de fortes fluctuations pour les concentrations en sables, pouvant être dues soit à une variabilité élevée des concentrations sur le site de prélèvement (aval barrage Isère en rive droite), soit aux difficultés de prélèvement depuis la berge, soit liées à une erreur d'analyse. Les mesures restent cependant cohérentes puisque nous retrouvons les valeurs de concentration totale mesurées par EDF en sommant les concentrations en sable et en fine. La seconde méthode tend cependant à donner des valeurs légèrement supérieures, en particulier pour le site du barrage de Bourg-lès-Valence.

3.2 Flux de MES le long de la Basse-Isère jusqu'au Rhône

Sur la base d'une homogénéité des concentrations sur la section, le flux instantané $\Phi(t)$ peut être estimé selon l'équation :

$$\Phi(t) = Q(t) \times C(t) \quad (3.2)$$

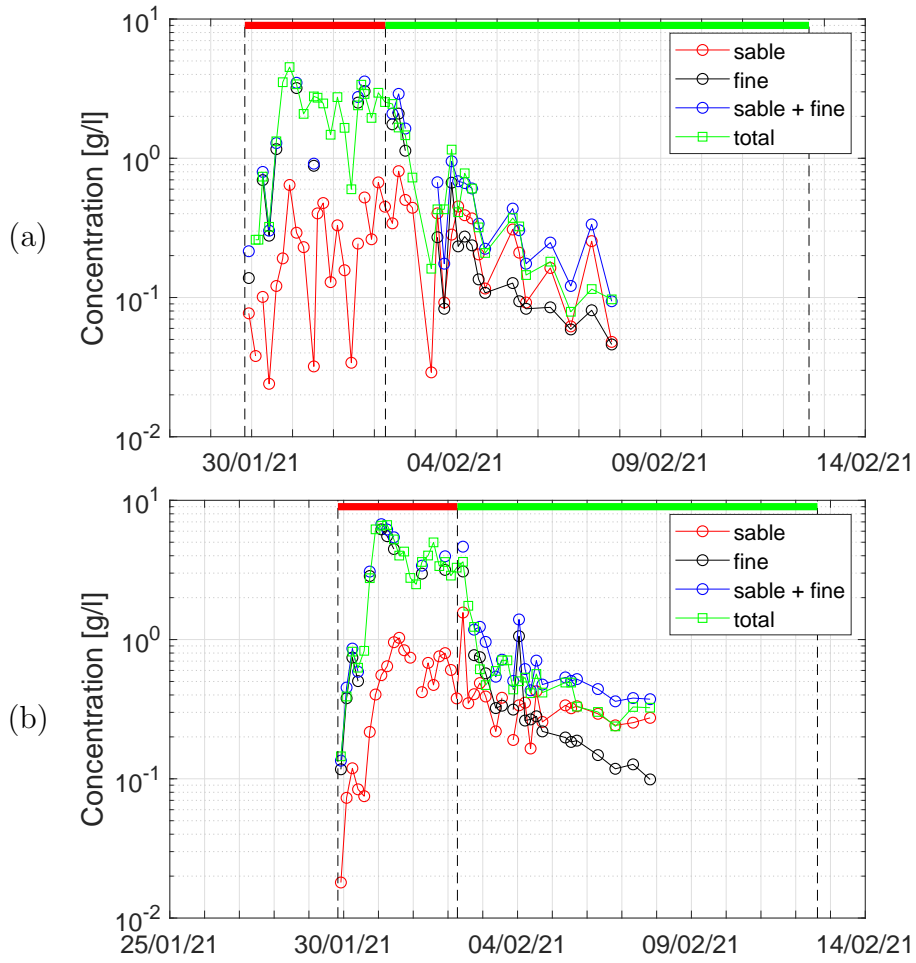


FIGURE 3.5 – Concentration en sable, en fine et totale au niveau des barrages Isère (a) et de Bourg-lès-Valence (b).

Il est ainsi possible d'évaluer les flux cumulés (ou masse ayant transité au travers d'une section) sur la durée de l'évènement :

$$M = \int_{t=t_0}^{t=t_0+T} \Phi(t) dt \quad (3.3)$$

avec t_0 la date du début de l'évènement et T la durée de l'évènement.

3.2.1 Basse-Isère

Sur la base des évaluations des concentrations totales et/ou uniquement de fines présentées en section 3.1.1, il est possible de calculer les flux instantanés et cumulés sur les stations de la Basse-Isère. Du fait des débits et surtout

des concentrations plus faibles à Tullins, les flux instantanés y sont bien plus faibles qu'à Beaumont-Monteux indiquant de façon claire les apports liés à la chasse des barrages de la Basse-Isère.

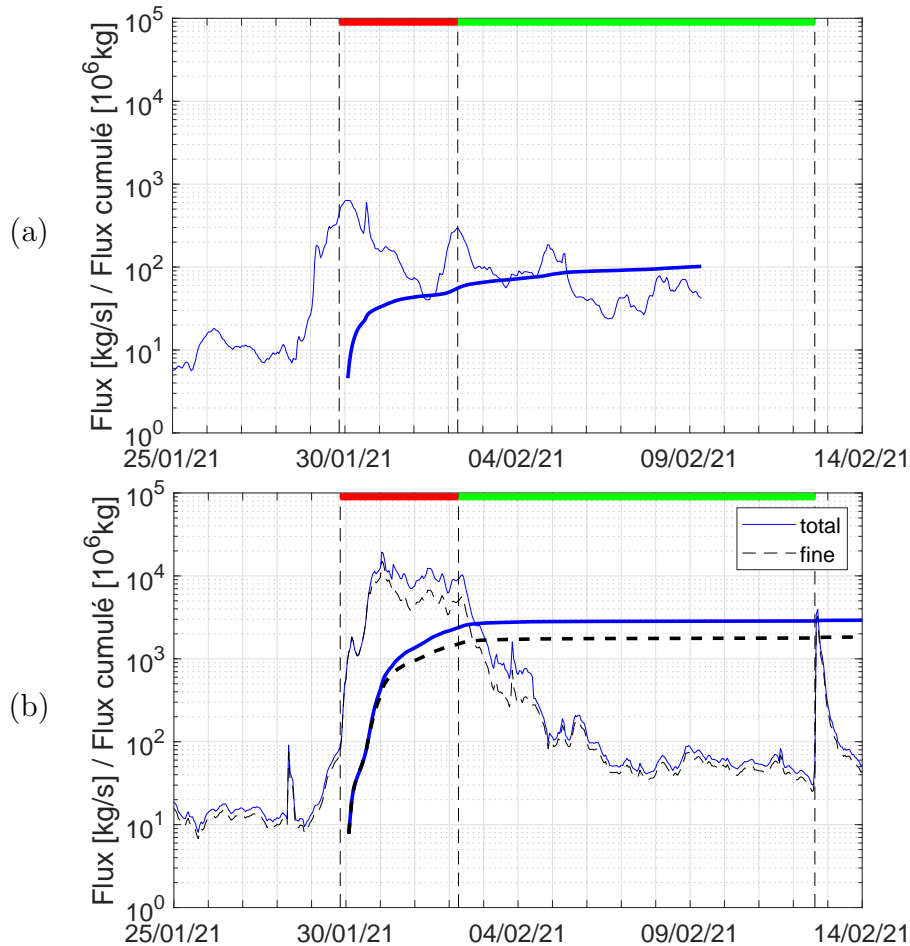


FIGURE 3.6 – Flux instantanés et cumulés pour les fines et les MES totale au niveau des stations de Tullins (a) et Beaumont-Monteux (b).

Au final, les flux cumulés sur la période de la chasse à Tullins sont de 1.02×10^5 t. Nous pouvons supposer que les concentrations en sable sont négligeables à Tullins (cf. courbe de calibration de la turbidité Fig. 3.1), et donc que les flux transitant à Tullins ne correspondent qu'à des fines. Il est cependant à noter que des sables ont été retrouvés dans les prélèvements ISCO à Tullins lors de la crue de décembre 2021 ($800 \text{ m}^3/\text{s}$). Les flux cumulés sur la période de la chasse à Beaumont-Monteux, respectivement pour les MES totales et les fines uniquement, sont de 2.84×10^6 t et 1.77×10^6 t (cf. calibration de la turbidité Tab. 3.1). La différence donnerait un flux cumulé

de sable $M_{s,BM} = 1.07 \times 10^6$ t. Sur la base de ces calculs, en supposant que le calcul pour les MES totales est correct, nous pouvons conclure que les barrages ont apporté lors de l'évènement de chasse de janvier-février 2021 1.67×10^6 t de fines et 1.07×10^6 t de sables.

3.2.2 Rhône à la confluence avec l'Isère

De la même manière que sur la Basse-Isère, il est possible de calculer les flux instantanés et cumulés sur les sites R2 (barrage Isère) et R3 (barrage de Bourg-lès-Valence) du Rhône sur la base des prélèvements ponctuels réalisés (cf. Fig. 3.4) et des débits estimés aux barrages (cf. Fig. 2.4b). Les chroniques de flux sont présentées Figure 3.7. Au niveau du barrage de Bourg-lès-Valence, nous retrouvons des flux assez similaires à ceux évalués à la station de Beaumont-Monteux sur l'Isère avec des valeurs plus faibles lors de la crue/chasse puis plus élevées après l'évènement. Ceci indiquerait un potentiel dépôt de MES sur la partie aval de l'Isère rapidement repris par l'écoulement. Du fait des débits relativement plus faible au barrage Isère, les flux sont bien évidemment plus faibles pour des concentrations du même ordre de grandeur.

Les flux cumulés sur la période de la chasse au barrage Isère et de Bourg-lès-Valence sont respectivement :

- sables : $M_{s,bI} = 3.4 \times 10^4$ t et $M_{s,bBLV} = 6.7 \times 10^5$ t
- fines : $M_{f,bI} = 1.4 \times 10^5$ t et $M_{f,bBLV} = 2.41 \times 10^6$ t
- total : $M_{t,bI} = 1.7 \times 10^5$ t et $M_{t,bBLV} = 2.73 \times 10^6$ t

La légère non-concordance entre les flux de fines, de sables et flux totaux à Bourg-lès-Valence est simplement lié au fait que le flux total est estimé à partir des mesures EDF alors que les flux de fines et sables sont estimés à partir des mesures INRAE. Cela peut donner une idée des incertitudes sur les mesures d'analyse de concentration (environ 10%).

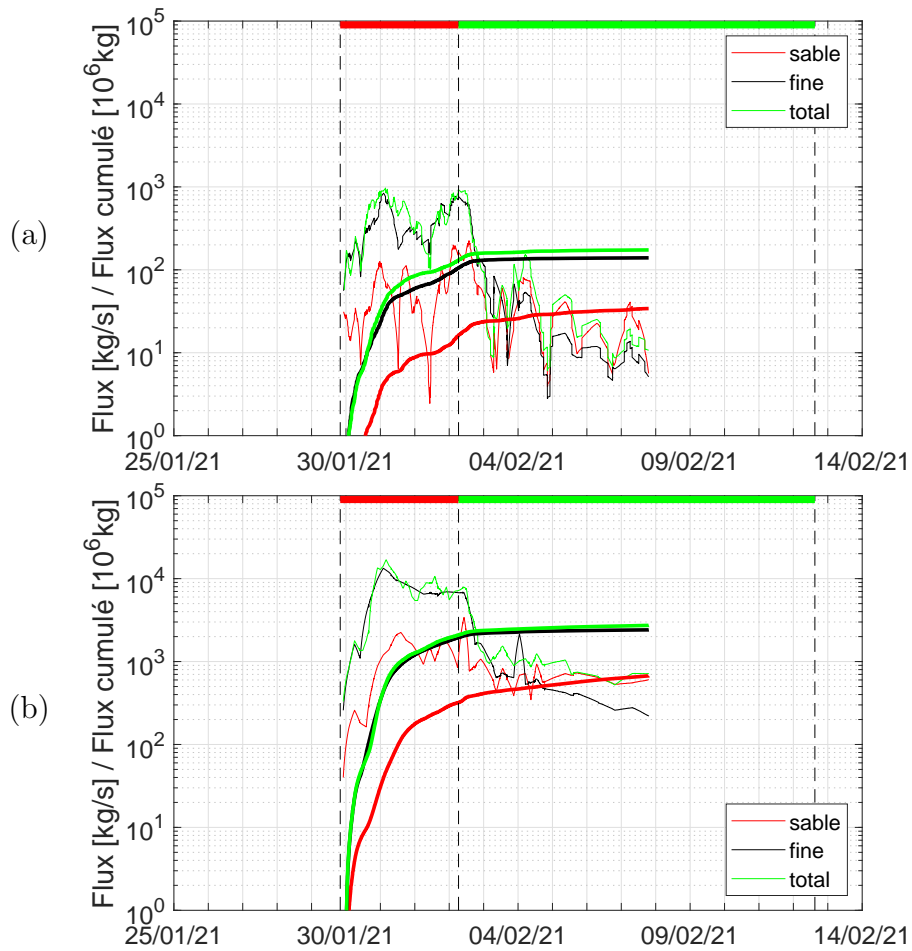


FIGURE 3.7 – Flux instantanés et cumulés pour les sables, fines et les MES total au niveau des barrages Isère (a) et de Bourg-lès-Valence (b).

Chapitre 4

Estimations des flux de sable

4.1 Méthodologie de mesure des flux mis en place

4.1.1 Jaugeage des flux charriés

Différents jaugeages solides des flux charriés ont été faits à Beaumont-Monteux à l'aide de la traille et au pont Vélo-Route à partir d'un camion jaugeur. Le charriage a été estimé à partir de prélèvements avec un Helley-Smith d'ouverture $b = 7.6$ cm.

$$Q_{sb,exp} \approx \sum_{j=1}^m \overline{q_{sb,exp,j}} L_{ab,j} \quad (4.1)$$

avec m le nombre de verticales de mesure, $\overline{q_{sb,exp,j}}$ la valeur moyenne du transport solide par charriage estimée sur cette verticale, et $L_{ab,j}$ la largeur active du charriage associée à cette verticale.

4.1.2 Jaugeage de la suspension sableuse

Différents jaugeages solides de la suspension sableuse ont été faits à Beaumont-Monteux à l'aide de la traille et au pont Vélo-Route à partir d'un camion jaugeur en utilisant un préleveur US-P72 ou une bouteille de Delft. Si le préleveur US-P72 permet de prélever un échantillon total en un point de la section que l'on pourra analyser a posteriori pour en déduire la concentration en sable, la bouteille de Delft permet d'estimer directement le flux de sable en un point de la section :

$$q_{ss,exp,i} = k \frac{M}{\rho_s S_p T_p} \quad (4.2)$$

où $q_{ss,exp,i}$ est le débit solide en suspension exprimé en $m^3/s/m^2$ mesuré à la hauteur z_i , k le coefficient d'efficacité de la bouteille de Delft, M la masse sèche prélevée (en kg), ρ_s la masse volumique du sédiment, S_p la surface de la section d'entrée du système de prélèvement et T_p le temps de prélèvement.

Ainsi, la mesure du transport solide en suspension sur la section pourra être estimée en première approximation selon :

$$Q_{ss,exp} \approx \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n q_{ss,exp,ij} \Delta z_{ij} L_{as,j} \quad (4.3)$$

avec m le nombre de verticales de mesure, $q_{ss,exp,ij}$ la valeur du transport solide en suspension par unité de surface au niveau du point de mesure sur la verticale j à la hauteur z_{ij} au dessus du fond, Δz_{ij} la hauteur associée à cette mesure sur la verticale j et $L_{as,j}$ la largeur active de la suspension associée à cette verticale. $q_{ss,exp,ij} = C_{ij} U_{ij}$ avec C_{ij} la concentration en sable de l'échantillon prélevé et U_{ij} la vitesse moyenne (dans le temps) de l'écoulement au point d'altitude z_{ij} au dessus du fond de la verticale j . Cette vitesse peut être issue de mesures ADCP (soit d'un jaugeage, soit d'une mesure en fixe sur la verticale j), voire d'une estimation à partir des mesures de débit à la station (en l'absence de mesure directe).

Les flux ponctuels mesurés à l'aide de la bouteille de Delft permettent d'estimer directement la valeur de $q_{ss,exp,ij}$, qui en utilisant l'équation 4.3 sont intégrés sur la verticale puis sur la largeur de chacune des sous sections (méthode de la section médiane). La bouteille de Delft a l'avantage de permettre le prélèvement de quantités de sable en suspension importantes qui peuvent permettre plus aisément des analyses a posteriori, en particulier pour la granulométrie.

Les jaugeages solides avec le préleveur US-P72 sont calculés conformément aux procédures de l'USGS (Gray & Landers 2014) : une concentration moyenne dans la section est calculée à partir de l'intégration spatiale des différents points de mesure de concentration dans la section. En assimilant les n mesures sur une verticale à une unique mesure intégrée sur cette verticale, cette concentration C_m est donc obtenue en faisant l'hypothèse d'un prélèvement isocinétique :

$$C_m = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{\sum_{i=1}^n C_{ij} V_{ij}}{\sum_{i=1}^n V_{ij}} \quad (4.4)$$

avec C_{ij} la concentration en sable de l'échantillon prélevé et $V_{ij} = U_{ij} \Delta t_{ij} S_p$ le volume prélevé (Δt_{ij} : temps de prélèvement, S_p : surface de la section d'entrée du préleveur). Chaque échantillon subit une analyse différenciée des

sables et des sédiments fins. Cette concentration moyenne est ensuite combinée au débit issu de la courbe de tarage pour obtenir un flux de sable et de fines, soit :

$$Q_{ss,exp} = C_m Q \quad (4.5)$$

Cette procédure de l’USGS se base cependant sur plusieurs hypothèses qui ne sont pas nécessairement respectées ici. En effet, les simplifications de l’équation 4.3 permettant d’arriver à $Q_{ss,exp} = C_m Q$ nécessitent que les verticales soient choisies selon la procédure EDI (“Equal Discharge Increment”), soit que les débits partiels sur chacune des verticales soient égaux ($Q_j = Q/m$), et que la description des verticales soit réalisée avec des points de mesures équidistants, soit $\Delta z_{ij} : h_j/(n+1)$, et que les temps de prélèvement Δt_{ij} soient constants. Nous avons fait ici l’hypothèse que l’erreur liée à ses simplifications restent négligeables devant les nombreuses incertitudes de mesure, y compris liées au non-respect d’un prélèvement iso-cinétique. Il sera cependant utile de vérifier cette hypothèse par la suite.

4.2 Mesure des flux de sable en suspension sur le tronçon aval de l’Isère

4.2.1 Barrage de Beaumont-Monteux

Concentrations mesurées au barrage de Beaumont-Monteux

Des échantillons ont été prélevés par pompage au niveau du barrage de Beaumont-Monteux. Du fait d’un prélèvement proche des vannes dans une zone très turbulente, nous faisons l’hypothèse que le mélange est homogène et donc que les concentrations estimées par ces prélèvements sont représentatives de l’ensemble de la section. Un premier échantillon de sable a été mesuré in-situ (masse humide M_{sw}) après un tamisage d’un volume prélevé V_s . La concentration estimée en sable est alors :

$$C_{se} = \frac{M_{sw}(1 - p_w)}{V_s} \quad (4.6)$$

avec $p_w = 0.3$ la teneur en eau estimée. Un second échantillon de 2 l a été prélevé et analysé en laboratoire selon la méthode proposée par [Dramais et al. \(2018\)](#), en séparant les sables et les sédiments fins par tamisage à $63 \mu\text{m}$.

La Figure 4.1 présente les résultats des analyses pour les fines. A titre de comparaison, nous présentons aussi les résultats de turbidité corrigée (cf. paragraphe 3.1) issus de la station de Beaumont-Monteux située environ deux kilomètres en aval (Fig. 2.1). Une bonne concordance des résultats apparaît

même si les valeurs de concentration à la station de Beaumont-Monteux sont généralement plus élevées (de près de 50%) sur la période de la chasse. Ceci peut être dû au fait que le calage réalisé se base sur des mesures de concentration totale pouvant potentiellement inclure des sables. Si nous nous basons sur les mesures de concentration en fines au barrage, un nouveau calage de la turbidité permet d'améliorer la concordance des résultats (cf. Tab. 3.1).

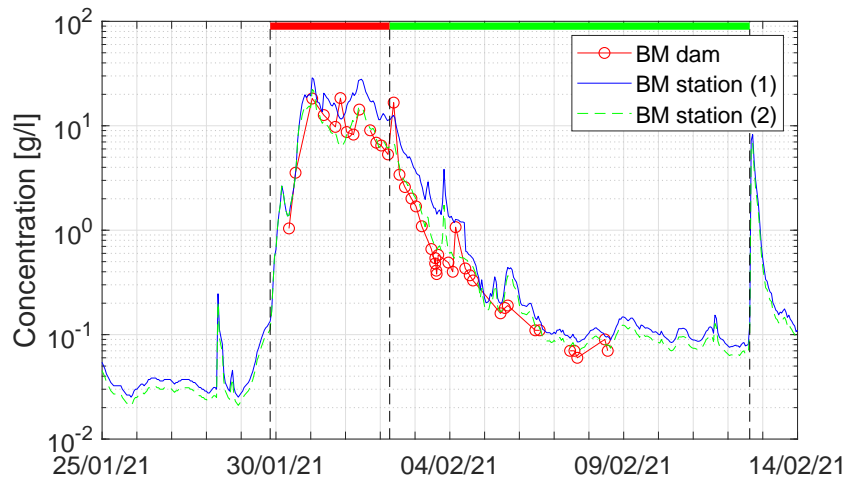


FIGURE 4.1 – Concentrations en fines mesurées au niveau du barrage de Beaumont-Monteux avec un prélèvement par pompage (les valeurs de turbidité corrigée à Beaumont-Monteux correspondent à un calage sur la base des concentrations totales (1) ou sur la base des concentrations en fines (2), cf. Tab. 3.1).

La Figure 4.2 présente les résultats des analyses pour les sables. Il apparaît que la méthode in-situ pour l'évaluation des concentrations en sable donne des résultats tout à fait cohérents avec les mesures en laboratoire a posteriori même si surestimés pour la seconde partie de l'évènement d'un facteur 2 à 10 (Fig. 4.1a). Ceci pourrait être dû à une sous-estimation de la teneur en eau (une analyse plus détaillée des échantillons indique une teneur en eau plus proche de $p_w = 0.35$) mais aussi aux incertitudes plus élevées pour les faibles concentrations, y compris pour la méthode d'analyse des échantillons en laboratoire. Les pics de concentrations observés à partir de l'analyse des échantillons lors de la période de la chasse (Figs.4.2a) n'ont pas nécessairement été observés à partir de la méthode in-situ (tamisage d'un volume de plusieurs dizaines de litres) et pourraient être erronés. Ceci pourrait induire une surestimation des flux.

Il est aussi intéressant d'observer que la teneur en sable lors de la chasse est très importante (Fig. 4.1b). Elle fluctue en effet en 50 et 70% sur la

période de la chasse (y compris remplissage) avec une légère diminution (30 à 50%) à partir du 5 février où tous les barrages sont fermés et à cote haute à l'exception du barrage de Beaumont-Monteux. Il y aurait donc un stock de sable non-négligeable dans la retenue de Beaumont-Monteux correspondant a priori aux apports des retenues amont lors de la chasse mais peut-être aussi à des reprises locales de dépôts de la retenue de Beaumont-Monteux.

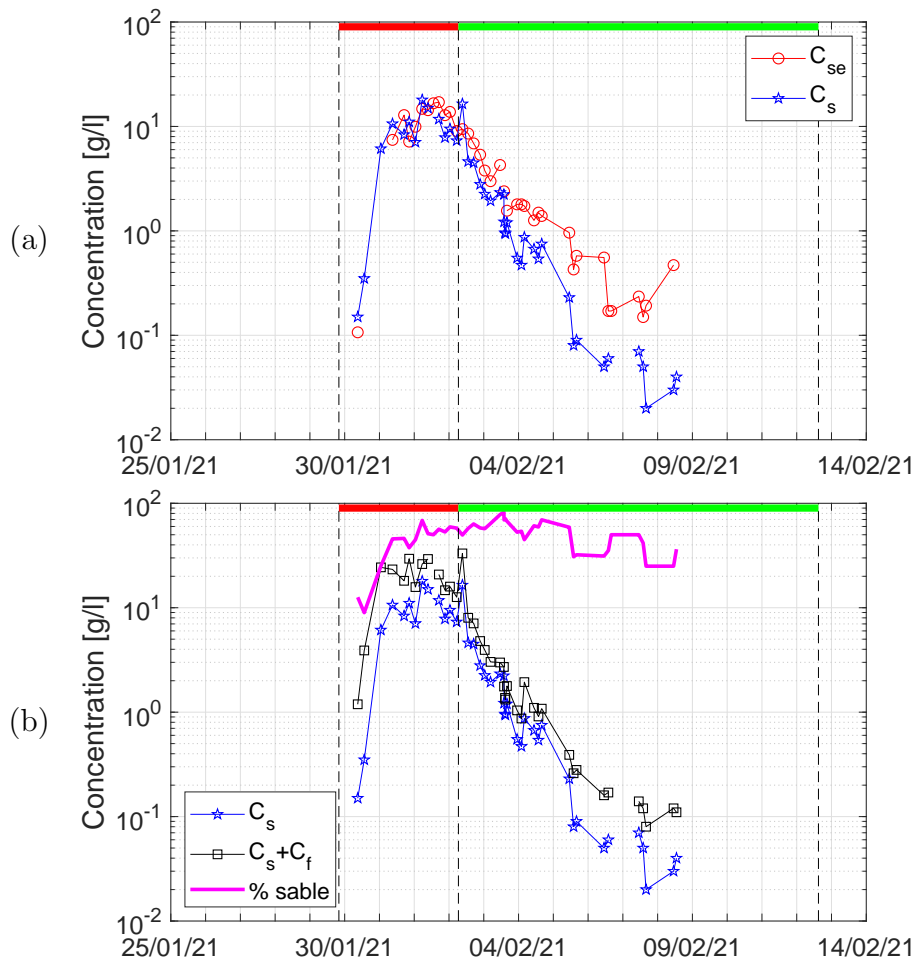


FIGURE 4.2 – Concentrations en sables mesurées au niveau du barrage de Beaumont-Monteux avec un prélèvement par pompage ; comparaison entre la méthode in-situ (C_{se}) et la méthode d'analyse des échantillons (C_s) (a) et relation entre concentration en sable et concentration totale (b).

Évaluation des flux au barrage Beaumont-Monteux

En faisant l'hypothèse d'une homogénéité des concentrations en fines et sables sur l'ensemble de la section et d'un débit égal à celui mesuré à la station de Beaumont-Monteux, il est possible d'évaluer les flux de fines et de sables lors de l'évènement sur la base des mesures de concentration au niveau du barrage. La Figure 4.3 présente les résultats de flux instantanés et cumulés pour les sables et fines. Comme observé précédemment sur la base des mesures de concentration, les flux de fine et de sable sont très similaires. Au final, les flux cumulés sur la période de la chasse sont de $M_{f,BMdam} = 1.89 \times 10^6$ t et $M_{s,BMdam} = 1.65 \times 10^6$ t pour les fines et sables respectivement. Si la valeur pour les fines est cohérente avec celle obtenue par la station de turbidité de Beaumont-Monteux (calée pour les fines, $M_{f,BM} = 1.77 \times 10^6$ t, cf. section 3.2), elle est beaucoup plus élevée pour les sables ($M_{s,BM} = 1.07 \times 10^6$ t). Ceci indiquerait qu'un fort dépôt de sable a eu lieu entre le barrage et la station de Beaumont-Monteux, ce qui est peu probable. L'explication viendrait plutôt de la non-représentativité de la position en berge pour les concentrations en sable ou plutôt que la concentration en berge diffère de la concentration moyenne sur la section.

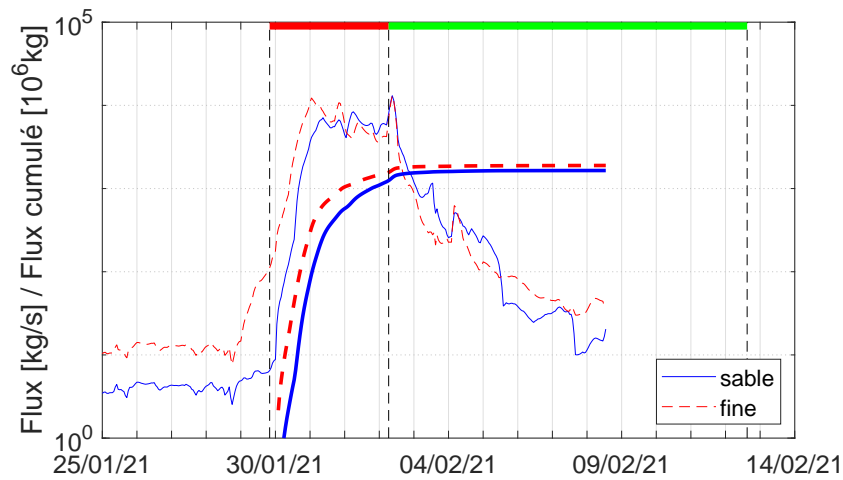


FIGURE 4.3 – Flux instantanés et cumulés pour les sables et fines au niveau du barrage de Beaumont-Monteux.

4.2.2 Traille de Beaumont-Monteux

Données collectées

Au niveau de la traille de Beaumont-Monteux, 13 jaugeages solides ont été réalisés à l'aide du préleveur US-P72 ou de la bouteille de Delft (Tab. 4.1). Ces jaugeages incluent en général 12 points de mesure correspondant à $n = 4$ points (à environ 50 cm au dessus du fond, 1.5 m, 3 m et sous la surface) pour chacune des $m = 3$ verticales ($y = 36, 59$ et 81 m).

TABLE 4.1 – Synthèse des jaugeages solides en suspension réalisés au niveau de la traille de Beaumont-Monteux (\bar{C}_s : concentration moyenne en sable sur la section de mesure.

Date	Débit [m ³ /s]	Préleveur	\bar{C}_s [g/L]	$Q_{s,exp}$ [kg/s]
29/01/2021 après-midi	581	P72	0.03	16
30/01/2021 matin	708	P72	0.48	338
30/01/2021 après-midi	700	HS	-	0.7
31/01/2021 après-midi	623	P72	8.8	5450
01/02/2021 matin	444	P72	12.2	5420
01/02/2021 après-midi	460	P72	11.9	5480
01/02/2021 après-midi	496	BD	3.3	1660
02/02/2021 matin	810	BD	1.7	1380
02/02/2021 après-midi	618	P72	6.5	4000
03/02/2021 matin	410	BD	2.0	800
03/02/2021 après-midi	516	P72	1.5	772
04/02/2021 matin	549	P72	0.99	543
04/02/2021 matin	529	BD	0.94	495
09/02/2021 matin	567	HS	-	10
09/02/2021 matin	539	BD	0.20	109

Il est important de noter que les estimations du débit solide en suspension avec la bouteille de Delft sont souvent plus faibles d'un facteur 2 à 4 que celles obtenues avec le préleveur US-P72. Cette potentielle sous-estimation serait due aux pertes de sédiments pour les vitesses élevées comme déjà relevé par [Beverage & Williams \(1989\)](#). À noter que [Dijkman \(1978\)](#) a proposé des facteurs de corrections pour les larges vitesses; [Dijkman & Milisic \(1982\)](#) déconseillent l'utilisation de la bouteille de Delft pour une vitesse supérieure à 2.5 m/s. Cependant, de nombreuses difficultés ont été aussi observées avec la US-P72 du fait des nombreux débris; le remplissage de la bouteille se faisait très mal nous obligeant à retirer l'embout sur certaines campagnes de mesure. Cet échantillonnage clairement non-isocinétique (en sous-vitesse) a pu induire une sur-estimation des concentrations ([Gray & Gartner 2009](#)).

Du fait des écoulements très chargés (y compris en débris végétaux) et très turbulents, seuls quelques prélèvements de charriage ont été réalisés avec le préleveur Helley-Smith et le 30 janvier au matin (1 échantillon à l'abscisse $y = 22$ m) et en fin d'après-midi (3 échantillons à l'abscisse $y = 36$ m). En effet, le risque de colmatage du préleveur rendait le déploiement difficile et nous pouvons de plus considérer que la suspension de sable est prédominante sur ce site (Camenen et al. 2019).

Variabilité spatiale des concentrations et flux

L'ensemble des graphiques décrivant la variabilité spatiale des concentrations (fines et sables) est présenté en annexe, au paragraphe A.2.1. Il est à noter que le zéro en latéral est fixé à la berge gauche soit trois verticales à $y = 17, 42$ et 65 m correspondant respectivement à $y = 81, 59$ et 36 m pour le repère de la traîlle où le zéro se situe à la cabane CNR (en rive droite). Quatre points ont été prélevés sur les trois verticales sauf pour les campagnes de 31 janvier (3 points), du 3 février (2 à 3 points), et 4 février (4 points sur la seule verticale en rive droite). Contrairement à ce à quoi on pouvait s'attendre, les gradients de concentration en sable ne sont pas très prononcés avec souvent une relative homogénéité des concentrations en sable sur la section. Ceci peut s'expliquer par les fortes vitesses et fortes turbulences observées sur la section lors de l'évènement de chasse. Concernant les fines, nous retrouvons une bonne homogénéité spatiale des concentrations mais avec tout de même une certaine variabilité pouvant être liée aux incertitudes (prélèvement US-P72, séparation sable-fines, filtration).

De manière similaire, l'ensemble des graphiques décrivant la variabilité spatiale des flux en sable avec la bouteille de Delft sont présentés en annexe, au paragraphe A.2.2. Il est à noter que le flux étant égal au produit de la concentration et de la vitesse, le gradient vertical en concentration (maximum au fond) est partiellement compensé par le gradient vertical des vitesses (maximum proche de la surface). On retrouve donc en général une courbe en forme de cloche avec un maximum sur la partie inférieure de la colonne d'eau.

Représentativité d'une mesure en berge

La figure 4.4 présente une comparaison entre les évaluations des concentrations en fines et en sable en berge et sur la section. Nous retrouvons bien une concordance aux incertitudes près entre la concentration en fines mesurée en berge avec l'ISCO et la concentration moyenne en fines sur la section estimée à l'aide des mesures avec le préleveur US-P72 confirmant l'hypothèse

d'un bon mélange sur la section pour la fraction fine (Fig. 4.4a). Concernant la fraction sableuse, nous observons une corrélation très nette entre la concentration mesurée en berge avec l'ISCO et la concentration moyenne sur la section estimée à partir des mesures avec le préleveur US-P72 (Fig. 4.4b). Même si les mesures avec le préleveur US-P72 sont incertaines avec un potentiel biais (surestimation du fait d'un prélèvement en sous-vitesse), cela indique un fort potentiel d'utilisation des mesures ISCO comme concentration témoin (Santini et al. 2019), i.e.

$$C_{sm} = \alpha_{sm} C_{berge,ISCO} \quad (4.7)$$

avec α_{sm} un coefficient ($\alpha_{sm} = 1.4$ selon la Fig. 4.4b)

Il est possible d'évaluer une chronique des concentrations en sable sur la base des prélèvements ISCO en berge même si cela nécessite ici d'extrapoler les mesures pour la fin de la période de remplissage (Fig. 4.5). A partir de l'équation 4.7, nous pouvons ainsi évaluer les flux de sable au niveau de la station de Beaumont-Monteux sur la base des mesures ISCO en berge. Nous estimons ainsi les flux de sable sur la chasse à $M_{s,BM} = 1.52 \times 10^6$ t, ce qui se rapproche de la valeur estimée au barrage de Beaumont-Monteux ($M_{s,BMdam} = 1.65 \times 10^6$ t).

4.2.3 Pont Vélo-Route

Données collectées

Au niveau du pont Vélo-Route, 9 jaugeages solides de la suspension ont été réalisés à l'aide de la bouteille de Delft uniquement (Tab. 4.2). En effet, du fait des contraintes plus faibles à la confluence, il a été jugé plus opportun d'utiliser la bouteille de Delft qui est plus adaptée pour mesurer proche du fond du fait de sa structure. Ces jaugeages incluent en général 16 points de mesure correspondant à $n = 4$ points (à environ 50 cm au dessus du fond, 1 m, 2 m et sous la surface) pour chacune des $m = 4$ verticales correspondantes à chacune des travées du pont (T1 à $y = 19$ m, T2 à $y = 59$ m, T3 à $y = 99$ m et T4 à $y = 139$ m depuis la rive gauche).

De plus, 9 jaugeages solides du charriage ont été réalisés à l'aide d'un Helley-Smith en parallèle des mesures avec la bouteille de Delft (Tab. 4.2), soit sur les mêmes verticales.

Variabilité spatiale des concentrations et flux

Une exploration de la variabilité spatiale des concentrations a été réalisée à l'aide de la pompe immergée. Elle est présentée Fig. 4.6. On peut ainsi

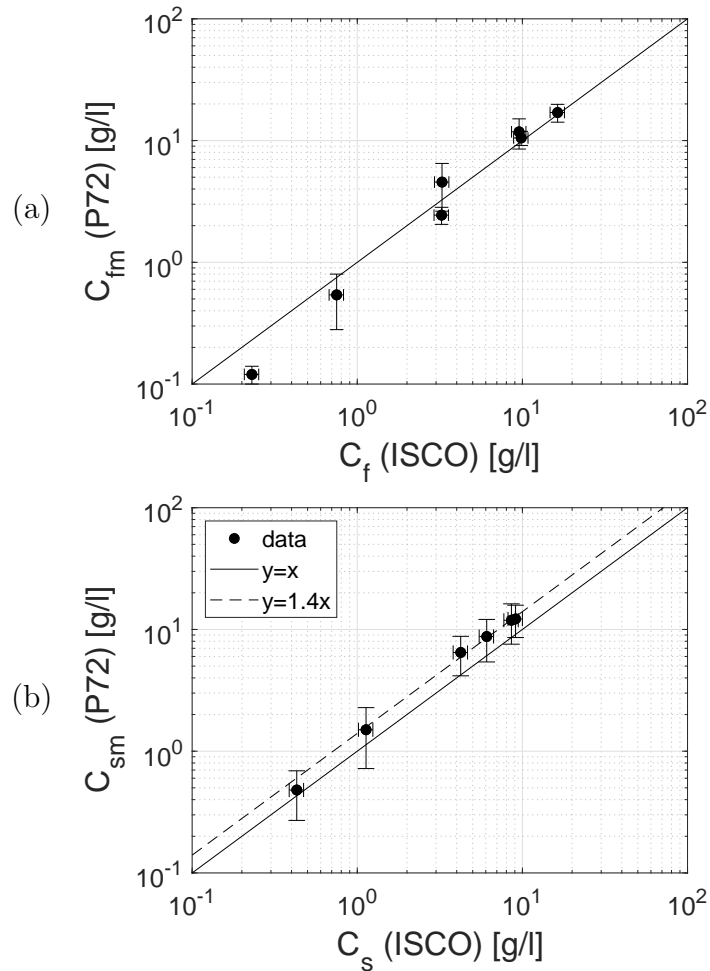


FIGURE 4.4 – Comparaison entre la mesure en berge avec un ISCO et les mesures moyennes dans la section avec un P72 pour la station de Beaumont-Monteux ; (a) : mesures de la concentration en fine, (b) mesures de concentration en sable.

remarquer que le gradient de concentration en sable est marqué, en particulier au niveau des travées 2 et 3 où les concentrations et les flux sont plus élevés. A partir de ces données de pompage distribué on peut calculer un flux de sable en calculant une concentration moyenne pour chaque verticale puis dans la section. Par cette méthode on obtient un flux de sable en suspension de 255 kg/s assez inférieur aux estimations obtenues avec la bouteille de Delft (Tab. 4.2).

L'ensemble des graphiques décrivant la variabilité spatiale des flux en sable avec la bouteille de Delft est présenté en annexe, au paragraphe A.3. Comme discuté précédemment pour les données de la traîle de Beaumont-

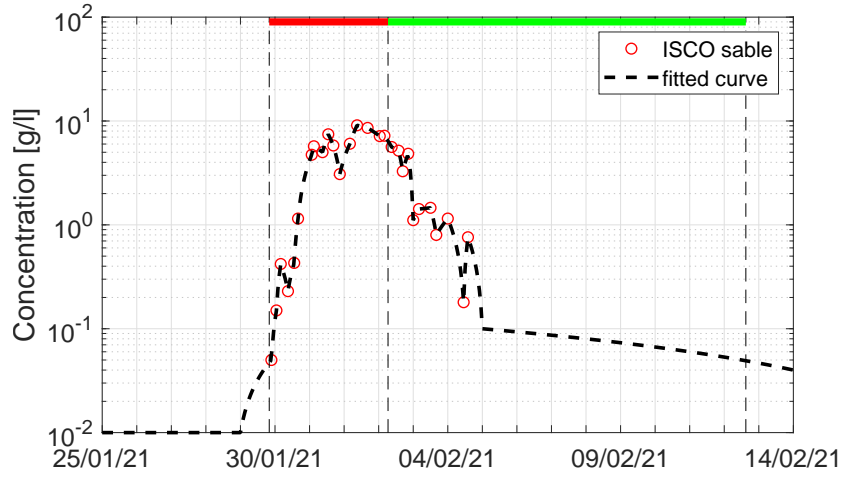


FIGURE 4.5 – Concentrations en sables mesurées à la station de Beaumont-Monteux à partir des prélèvements ISCO en berge.

TABLE 4.2 – Synthèse des jaugeages solides réalisés au niveau du pont Vélo-Route.

Date	Débit [m ³ /s]	Préleveurs	$Q_{sb,exp}$ [kg/s]	\bar{C}_s [g/L]	$Q_{ss,exp}$ [kg/s]
29/01/2021	602	BD, HS	4.4	0.01	8.6
30/01/2021	712	BD, HS	2.3	0.36	257
31/01/2021	621	BD, HS	-	2.41	1497
01/02/2021	439	BD, HS	1.5	2.33	1025
02/02/2021	639	BD	-	1.85	1185
03/02/2021	431	Pompage	-	0.59	255
03/02/2021	516	BD, HS	1.6	0.93	481
04/02/2021	492	BD	-	1.06	521
05/02/2021	539	BD, HS	2.8	0.67	359
09/02/2021	548	BD, HS	2.2	-	-

Monteux, l'analyse de la variabilité spatiale des flux est plus difficile à interpréter. Ces graphiques permettent toutefois de réaliser que nous nous sommes trop focalisés sur la partie basse de la colonne d'eau pensant que la majorité du flux s'y concentrait. Or les concentrations n'étaient pas négligeables en surface (cf. Fig. 4.6), donc les flux non plus.

Variabilité spatio-temporelle des concentrations et flux

La Figure 4.7 présente l'évolution temporelle des hauteurs d'eau et du débit solide en suspension mesuré avec la bouteille de Delft pour chacune des

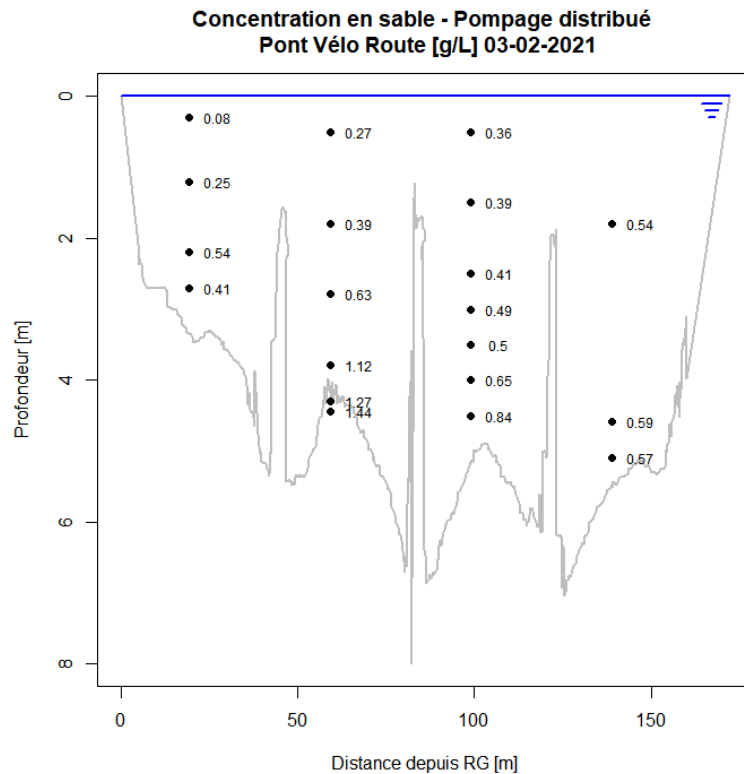


FIGURE 4.6 – Concentrations en sable mesurées par pompage distribué sur la section du pont Vélo-Route lors de la campagne du 3 février 2021.

travées du pont Vélo-Route. Du fait du niveau d'eau maintenant constant (PR1), une diminution de la hauteur correspond directement à une augmentation du niveau du fond, soit à un dépôt. On peut ainsi s'apercevoir qu'un dépôt de près de 1 m est apparu sur l'ensemble de la section suite à la période de chasse. Cependant, moins d'évolutions ont été observées au niveau de la travée T2 (dépôt de près de 0.5 m) alors que la travée T1 (la moins profonde) a subi plus de dépôts (dépôt de près de 1.5 m).

Concernant le débit solide en suspension, on peut voir qu'il est bien plus faible au niveau de la travée T1 alors qu'il est généralement plus élevé sur les deux travées centrales. De plus, même si les débits étaient déjà élevés le 29 janvier (cf. Fig. 2.2), le transport solide était très faible du fait de l'absence d'apport et donc de l'absence de sables au fond. Le transport solide augmente très fortement le 30 janvier mais sans atteindre a priori la capacité de transport de la rivière sur ce tronçon. Cette capacité de transport serait atteinte le 31 janvier. Il est difficile de dire si la diminution du transport

solide en début de phase de remplissage est liée à la diminution des apports ou la baisse de débit ou les deux.

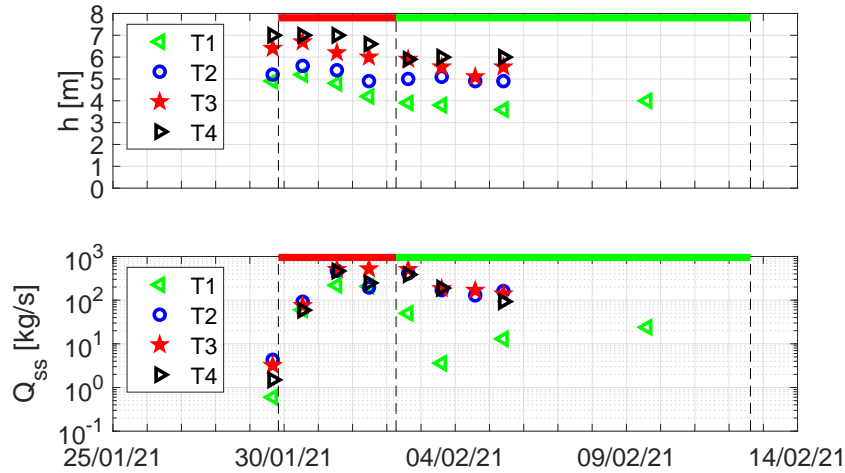


FIGURE 4.7 – Évolution temporelle des hauteurs d'eau et du débit solide en suspension pour chacune des travées du pont Vélo-Route.

4.3 Granulométrie des sables

4.3.1 Mesure de la distribution granulométrique des sables

La distribution granulométrique des échantillons sableux du 3 février pris à la traille de Beaumont-Monteux est présentée sur la Figure 4.8. De façon surprenante, on retrouve une granulométrie plus fine pour la bouteille de Delft par rapport à l'US-P72 : $d_{50} \approx 140 \mu\text{m}$ contre $d_{50} \approx 170 \mu\text{m}$. Du fait de sa fonction de décanteur, la bouteille de Delft peut potentiellement perdre une partie des sables les plus fins et donc avoir un biais granulométrique vers les grossiers. Ceci peut être expliqué par le non-respect du prélèvement iso-cinétique pour les échantillons avec la US-P72 ; un échantillonnage en sous-vitesse pouvant sur-représenter les particules les plus grossières (cf. Fig. 2.7B).

La Figure 4.9 présente des photographies au microscope d'échantillons de la bouteille de Delft et de l'US-P72. On retrouve une bonne cohérence entre les deux échantillons même si la granulométrie issue de l'US-P72 peut en effet être légèrement plus grossière.

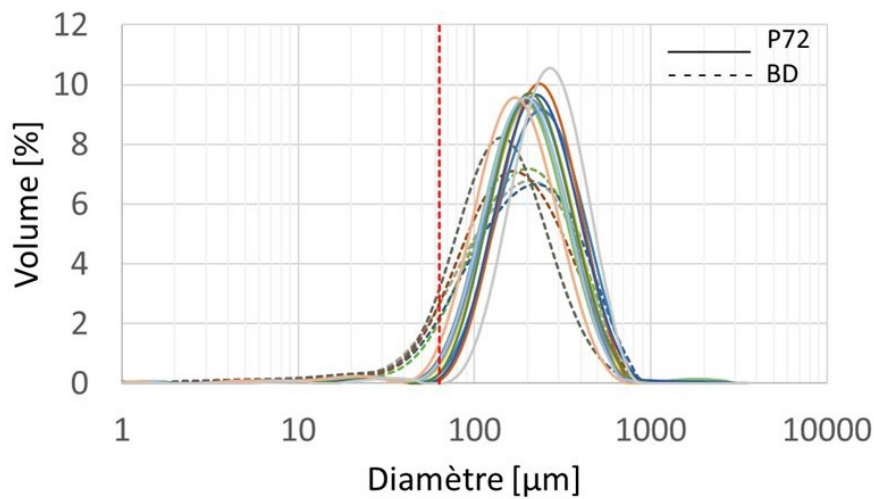


FIGURE 4.8 – Distributions granulométriques d'échantillons du 3 février à la bouteille de Delft et au préleveur US-P72 pris à traile de Beaumont-Monteux (le trait pointillé vertical rouge représente le seuil de 63μ).



FIGURE 4.9 – Photographies au microscope de sables issus d'échantillons prélevés à la traile de Beaumont-Monteux avec (a) la bouteille de Delft le 2 février en sub-surface et (b) le préleveur US-P72 le 3 février à 2 m sous la surface.

4.3.2 Évolution de la distribution granulométrique des sables

Sur le site de Beaumont-Monteux on observe une augmentation progressive de la granulométrie des sables prélevés durant l'évènement (cf. Figure 4.10). Ce constat est le même que ce soit au niveau du barrage avec un prélèvement par pompage ou au niveau de la traile avec les moyens de prélèvement à disposition (ISCO, US-P72 ou bouteille de Delft). La majeure partie

des sables transportés (entre le 31 janvier et le 2 février) sont constitués de sables avec un d_{50} de l'ordre de $100 \mu\text{m}$. Lors de la phase de remplissage où les flux de sable décroissent rapidement (cf. Figs. 4.3, 4.5 et 4.7), la granulométrie augmente jusqu'à atteindre un maximum le 6-7 février avec un $d_{50} = 400 \mu\text{m}$. Il est ainsi possible de modéliser l'évolution du d_{50} à Beaumont-Monteux sur la base de fonction simple du temps comme représenté par la courbe noire sur la Figure 4.10a.

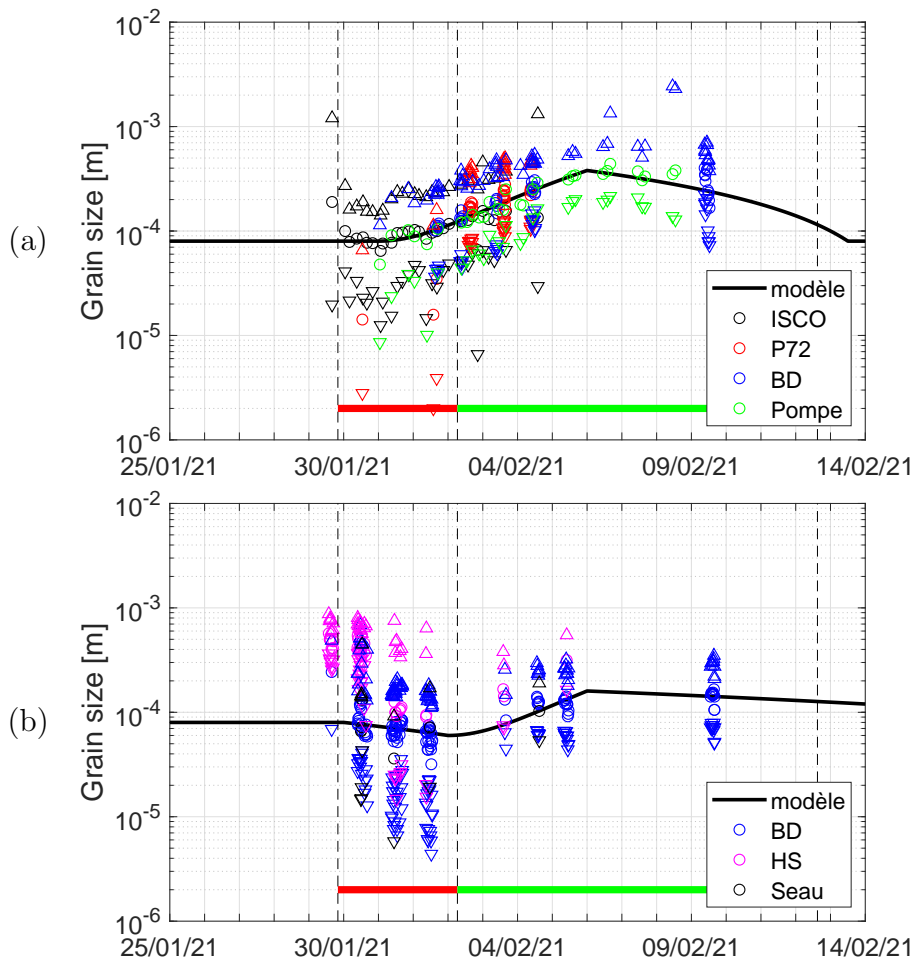


FIGURE 4.10 – Evolution des caractéristiques de taille de sédiment (cercles : d_{50} , triangles pointés vers le bas : d_{10} , triangles pointés vers le haut : d_{90}) en fonction du temps et selon les appareils de mesure (ISOC, P72, et BD à la trille de Beaumont-Monteux, Pompe au barrage de Beaumont-Monteux (a) et au pont Vélo-Route (b)).

Il est à noter les valeurs particulièrement faibles de la granulométrie pour les deux échantillons avec la US-P72 pendant la période de chasse avec un $d_{50} \approx 15 \mu\text{m}$. Ceci pourrait être dû à une erreur expérimentale avec une

analyse de l'échantillon complet au lieu de l'échantillon tamisé à $60\mu\text{m}$.

Nous avons représenté un graphique similaire pour les données recueillies au pont Vélo-Route (Figure 4.10b). La granulométrie des échantillons est ici beaucoup plus fine et plus stable dans le temps. Le d_{50} tend ainsi à diminuer de 80 à $60\mu\text{m}$ lors de la période de chasse pour remonter vers les $150\mu\text{m}$ lors de la période de remplissage. De la même manière que pour Beaumont-Monteux, nous avons proposé de modéliser l'évolution du d_{50} à pont Vélo-Route sur la base de fonction simple du temps.

4.3.3 Gradients de sable sur la verticale

Sur le site de Beaumont-Monteux, les échantillons issus du préleveur US-P72 permettent de mettre en évidence des gradients de granulométrie des sables sur la verticale avec des particules plus grosses au fond (cf. Figure 4.11). On observe aussi des gradients avec les échantillons issus de la bouteille de Delft.

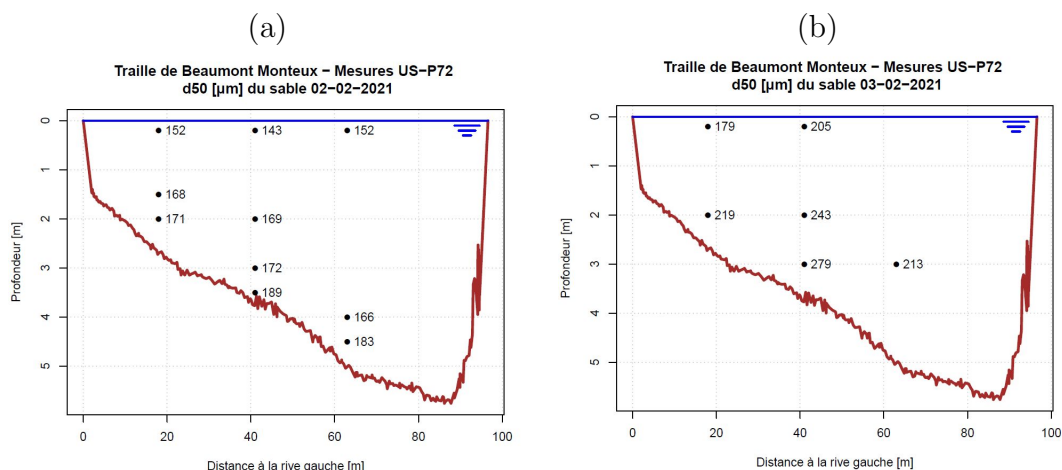


FIGURE 4.11 – Répartition des d_{50} des prélèvements dans la section de la traille de Beaumont-Monteux le 2 février 2021 (a) et le 3 février 2021 (b).

Sur le site de Vélo-Route avec les échantillons issus de la bouteille de Delft les gradients sont moins marqués pour certaines campagnes (cf. Figures 4.12) mais les échantillons sont moins répartis sur la colonne d'eau. Assez logiquement la granulométrie des sables recueillis dans les préleveurs Helly-Smith présente des d_{50} plus élevés que la suspension, à Vélo-Route le d_{50} se situe entre 400 à $600\mu\text{m}$ en début d'évènement puis baisse à partir du 31/01 vers $150\mu\text{m}$ pour remonter ensuite.

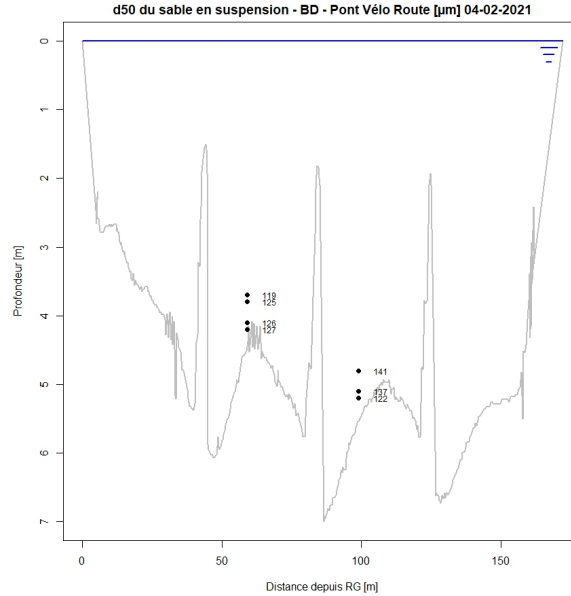


FIGURE 4.12 – Répartition des d_{50} des prélèvements dans la section Vélo-Route le 4 février 2021.

4.4 Modélisation simplifiée de la capacité de transport

4.4.1 Présentation du modèle

Sur la base des travaux de [Camenen et al. \(2011, 2014, 2019\)](#), le principe de ce modèle de transport solide sur une section de rivière se base sur la courbe de tarage hauteur-débit de la station hydrométrique. Ainsi, en ayant connaissance de la géométrie de la section de la rivière, l'inversion de la relation $Q = f(z)$ nous permet une estimation des paramètres hydrauliques moyens sur cette section, i.e. le rayon hydraulique R_h , la vitesse moyenne $V_m = Q/A_w$ (A_w : surface mouillée). Il est alors possible de calculer la contrainte de cisaillement adimensionnelle (ou paramètre de Shields) moyenne sur la section θ_m avec une hypothèse sur la composition granulométrique du fond de la rivière et en supposant que le profil vertical de vitesse suit une loi logarithmique pour le calcul du coefficient de frottement au fond ([Soulsby 1997](#), p.55) :

$$\theta_m = \left[\frac{\kappa}{1 + \ln(k_s/30R_h)} \right]^2 \frac{V_m^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (4.8)$$

avec $\kappa = 0.41$ la constante de Von Karman, k_s la hauteur de rugosité et d_{50} le diamètre médian des sédiments au fond de la rivière (supposés tous les deux constant sur la section de la rivière), $s = 2.65$ la densité du sédiment et $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ l'accélération de la gravité. La hauteur de rugosité effective (pour le charriage) est estimée telle que $k_s = 2d_{90}$ sur la base des caractéristiques du graviers composant le lit de l'Isère ($d_{90} \approx 0.01 \text{ m}$ en première approximation). La principale hypothèse ici est que les apports de sables lors de la chasse des barrages est suffisamment importante pour négliger l'influence de ces graviers sur le transport solide lors de l'évènement (Kuhnle et al. 2017).

Le transport solide par charriage est estimé ensuite en utilisant la formule de Camenen & Larson (2005), exprimé en m^3/s par mètre linéaire [m^2/s] :

$$q_{sb} = 12 \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \theta_m^{3/2} \exp\left(-4.5 \frac{\theta_{cr}}{\theta_m}\right) \quad (4.9)$$

avec θ_{cr} le paramètre de Shields critique pour le début de mouvement des particules (estimé à partir du diagramme de Shields-Yalin). Le transport solide en suspension est estimé en utilisant la formule de Camenen & Larson (2008), exprimé en m^3/s par mètre linéaire [m^2/s] :

$$q_{ss} = V_m c_R \frac{\epsilon}{W_s} \left[1 - \exp\left(-\frac{W_s h}{\epsilon}\right) \right] \quad (4.10)$$

avec c_R la concentration de référence, $h \approx R_h$ la profondeur d'eau, W_s la vitesse de chute des sables estimée à partir de la formule de Soulsby & Whitehouse (1997) et ϵ le coefficient de diffusion vertical. La concentration de référence et le coefficient de diffusion vertical sont calculés comme suit :

$$c_R = 1.5 \times 10^{-3} \exp(-0.2d_*) \theta \exp\left(-4.5 \frac{\theta_m}{\theta_{cr}}\right) \quad (4.11)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma_t}{6} \kappa u_{*mt} h \quad (4.12)$$

où $d_* = [(s-1)g/\nu^2]^{1/3}d$ est le diamètre sédimentologique, $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ la viscosité cinématique de l'eau à 20°C , $\sigma_t \approx 1$ le nombre de Schmidt turbulent, $u_{*mt} = \sqrt{\tau_{mt}/\rho}$ la vitesse de frottement totale (incluant les pertes de charge liées aux potentielles formes de fond), τ_{mt} la contrainte de cisaillement totale au fond et $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ la masse volumique de l'eau. La contrainte de cisaillement totale au fond τ_{mt} est calculée en utilisant l'équation 4.8 avec $k_s = 0.05 \text{ m}$ en faisant l'hypothèse d'une présence de rides de fond accentuant la turbulence sur la colonne d'eau. Comme discuté dans Camenen et al. (2011), il est aussi possible de faire une distribution des contraintes en travers de la

section et calculer le transport solide en utilisant les paramètres hydrauliques locaux. Selon la géométrie de la section, cela peut induire une augmentation de la capacité de transport calculée de près de 20% (Camenen et al. 2014). Du fait des fortes incertitudes observées et du manque de données pour caler le modèle, nous utiliserons seulement les paramètres moyennés sur la section. Finalement, le transport solide total sur la section Q_s [m³/s] peut être estimé tel que :

$$Q_s = L_a(\alpha_b q_{sb} + \alpha_s q_{ss}) \quad (4.13)$$

avec L_a la largeur active estimée sur la section de la rivière, α_b et α_s des coefficients de calage pour le charriage et la suspension, respectivement. Ces coefficients que l'on peut caler sur les données expérimentales prennent en compte les incertitudes liées aux formules de transport mais aussi la variabilité de la quantité de sable présente sur le lit de graviers (100% : lit couvert d'une couche de sable du fait d'un apport élevé ; 0% : absence de sable sur le lit du fait d'une absence d'apport).

4.4.2 Application à la station de Beaumont-Monteux

La Figure 4.13 présente les courbes de capacité de transport par charriage et suspension appliquées à la section de l'Isère au niveau de la traille de Beaumont-Monteux. Ces courbes supposent que les apports sont suffisants ($\alpha_b = \alpha_s = 1$). Les points expérimentaux indiquent cependant que la capacité de transport n'a été atteinte que sur une courte période entre le 31 janvier et le 2 février 2021 (voir aussi Tab. 4.1). Les mesures de transport solide en dehors de cette période sont bien en deçà des courbes de tarage.

Nous avons fait ici l'hypothèse d'un diamètre médian $d_{50} = 0.22$ mm, d'un diamètre correspondant au 90% de passant en masse $d_{90} = 10$ mm (du fait de la potentielle présence de graviers). Aussi, la hauteur de rugosité de forme a été évaluée à $k_{sf} = 0.05$ m en faisant l'hypothèse d'une présence potentielle de petites rides de fond.

En corrigeant les flux solides estimés par ces capacités de transport, nous avons pu évaluer la dynamique temporelle des flux solides sur l'évènement à Beaumont-Monteux. Pour la suspension, nous avons utilisé un coefficient α_s variant de 0.01 hors évènement à 4 lors de la chasse (cf. Figure 4.17b). Sur la base de Camenen et al. (2019), une décroissance exponentielle de α_s est proposée pour la période de remplissage. Pour le charriage, nous avons utilisé un coefficient $\alpha_b = \alpha_s/2$. Les résultats sont présentés Figure 4.17. Il nous a été ainsi possible d'évaluer les flux solides sableux par charriage et suspension lors de l'évènement : $M_{sb,BM} = 0.17 \times 10^6$ t et $M_{ss,BM} = 1.02 \times 10^6$ t, soit un flux total $M_{s,BM} = 1.19 \times 10^6$ t. Nous retrouvons une suspension prédominante

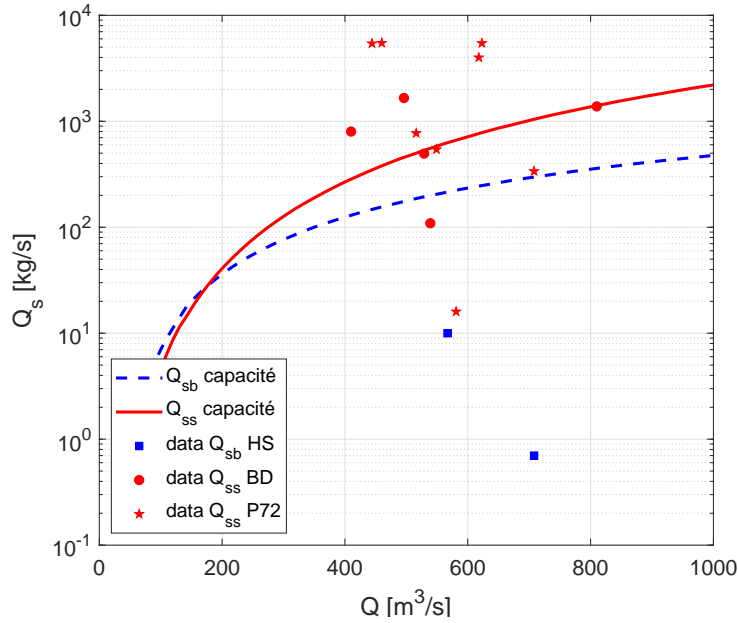


FIGURE 4.13 – Comparaison entre les courbes de capacité de transport et les mesures de charriage et suspension au niveau de la traîlle de Beaumont-Monteux.

sur le charriage avec à peu près un ordre de grandeur de différence. Il existe cependant peu de données de calage pour le charriage et ces dernières sont très incertaines. Pour la suspension, l'estimation reste aussi très inférieure à l'estimation réalisée au barrage de Beaumont-Monteux ($M_{s,BMdam} = 1.65 \times 10^6$ t, cf. Section 4.2.1). Il est à noter cependant que les flux solides donnés par le modèle sont très inférieurs aux mesures avec le préleveur US-P72 au moment de la chasse (entre le 31 janvier après-midi et le 2 février). Par contre, en prenant le flux total, on retrouve la valeur estimée à partir de la station de turbidité, i.e. contre $M_{s,BM} = 1.07 \times 10^6$ t à partir de la turbidité; ceci semble être cependant une coïncidence. Vu la courte distance entre le barrage et la section de la traîlle et les écoulements très intenses, les dépôts devraient y être négligeables et donc les flux solides égaux sur la durée de l'évènement. Les différences peuvent être partiellement expliquées par les incertitudes du modèles et des données de calage (différences observées entre la bouteille de Delft et le préleveur US-P72) lors de la chasse.

Aussi, nous avons pour l'instant fait l'hypothèse d'une granulométrie constante avec $d_{50} = 0.22$ mm. Or les prélèvements de suspension ont montré une forte variabilité de la granulométrie avec des valeurs beaucoup plus faibles lors de la période de la chasse et plus élevées lors de la phase de remplissage (Fig. 4.10). Il est possible d'appliquer le modèle en prenant un d_{50} variable (selon la fonction présentée Fig. 4.10). Les résultats sont présentés

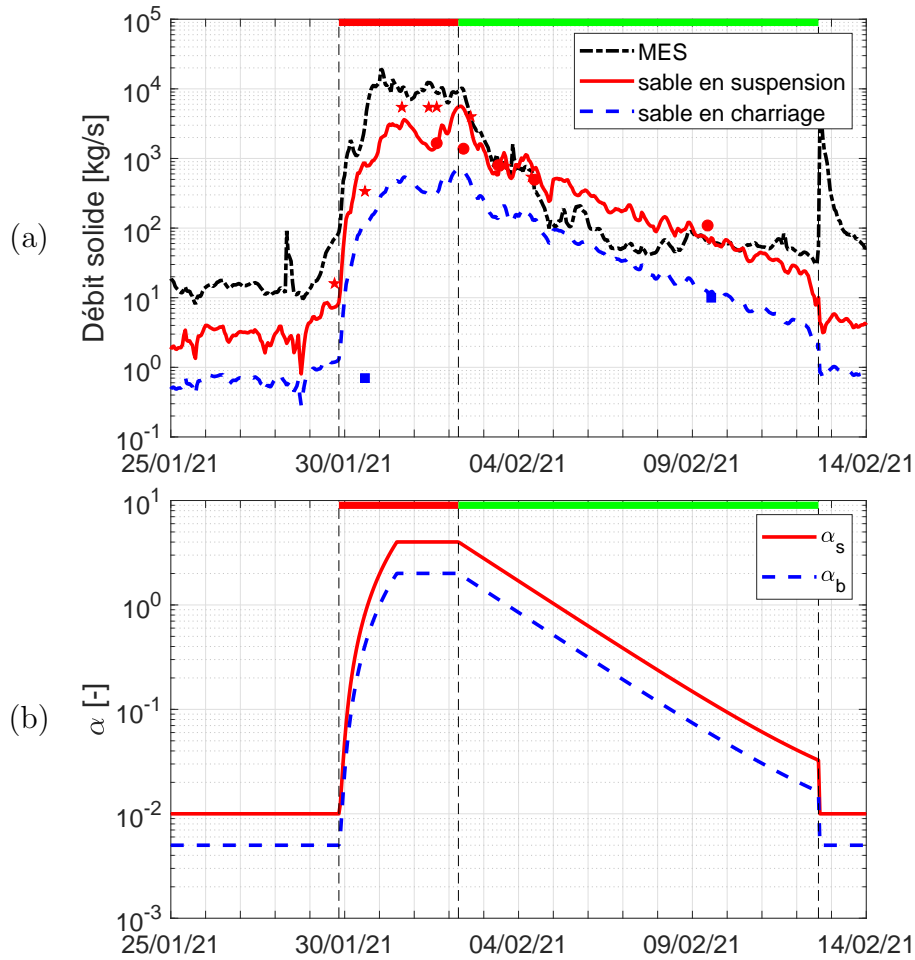


FIGURE 4.14 – Chronique des débits solides par charriage et suspension calés sur les mesures de charriage et suspension au niveau de la trille de Beaumont-Monteux (a) et coefficients de calage des formules de capacité α_b et α_s correspondants (b).

Figure 4.15; ils ont nécessité une modification des coefficients α_b et α_s même si nous avons conservé le découpage en 3 phases (hors-événement, chasse, remplissage). Pour la suspension, nous avons donc utilisé un coefficient α_s variant de 0.005 hors-événement à 2 lors de la chasse (cf. Figure 4.17b) et une décroissance exponentielle de α_s moins prononcée que précédemment pour la période de remplissage. Pour le charriage, nous avons toujours utilisé un coefficient $\alpha_b = \alpha_s/2$.

Avec ce calage, nous obtenons un flux solide plus élevé en particulier lors de la période de chasse où les résultats oscillent plus autour des mesures issues du préleveur US-P72. Les flux solides sableux par charriage et suspension lors de l'évènement ainsi estimés sont : $M_{sb,BM} = 0.03 \times 10^6$ t et $M_{ss,BM} =$

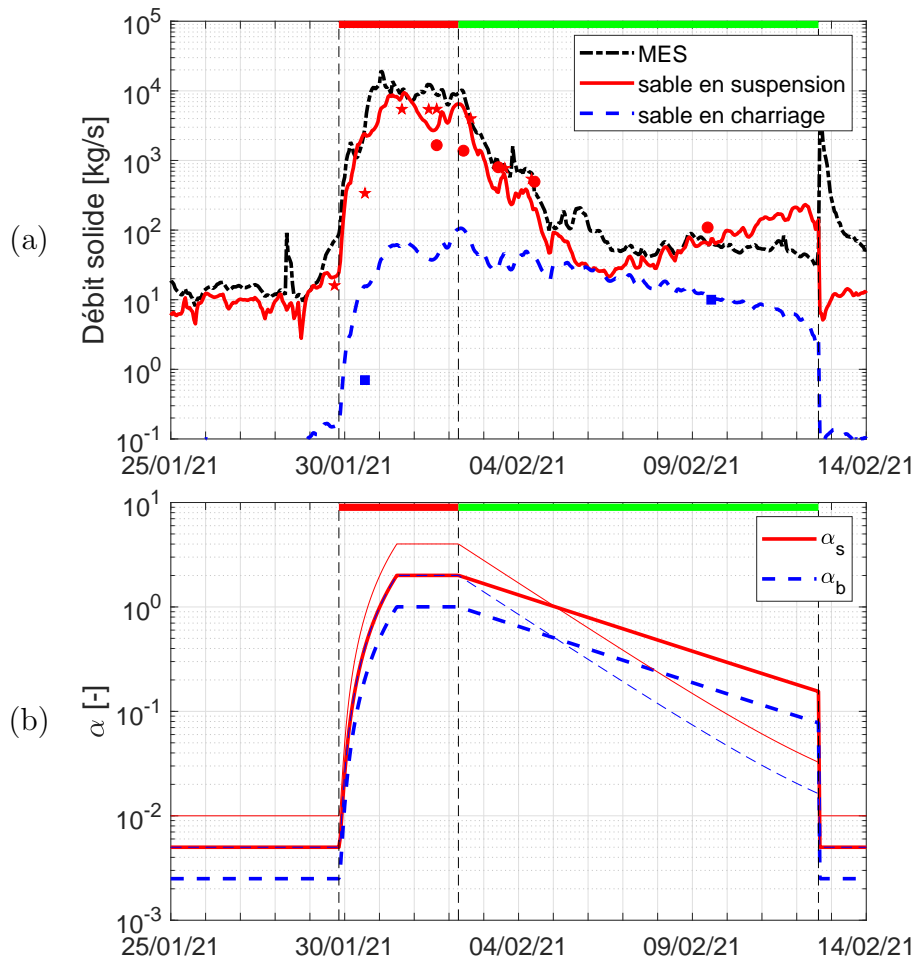


FIGURE 4.15 – Chronique des débits solides par charriage et suspension calés sur les mesures de charriage et suspension au niveau de la traille de Beaumont-Monteux en supposant une granulométrie variable dans le temps (a) et coefficients de calage des formules de capacité α_b et α_s correspondants (en trait fin sont présentés les coefficients de calage de la Fig. 4.14) (b).

1.71×10^6 t, soit un flux total $M_{s,BM} = 1.74 \times 10^6$ t. Ces deux calculs (en prenant en compte ou non un diamètre médian variable en temps) donne une indication des incertitudes sur l'évaluation des flux liés à l'évènement à partir d'un modèle calé sur un nombre limité de mesures.

4.4.3 Application à la section du Pont Vélo-Route

Pour l'application du modèle au Pont Vélo-Route, nous avons tout d'abord simplifié la section en quatre sous-sections (correspondant aux quatre travées)

de profondeur constante et de largeur 28 m. Comme indiqué au paragraphe 4.2.3, la cote de la surface libre est quasi constante car elle correspond au point de réglage (PR1). Si des dépôts se sont formés lors de la période de la chasse, nous pouvons cependant faire une hypothèse de profondeur constante avec $h_{T1} = 4.2$ m, $h_{T2} = 5.0$ m, $h_{T3} = 6.0$ m et $h_{T4} = 6.5$ m. La vitesse moyenne sur la section est ainsi estimée à partir du débit mesuré à la station de Beaumont-Monteux et de la section mouillée (supposée constante).

Nous avons fait ici l'hypothèse d'un diamètre médian plus fin qu'à Beaumont-Monteux $d_{50} = 0.15$ mm, d'un diamètre correspondant au 90% de passant en masse $d_{90} = 10$ mm (du fait de la potentielle présence de graviers). Aussi, la hauteur de rugosité de forme a été évaluée à $k_{sf} = 0.5$ m en faisant l'hypothèse d'une présence potentielle de rides et dunes de fond. La Figure 4.16 présente les courbes de capacité de transport par charriage et suspension appliquées à la section de l'Isère au pont Vélo-Route. Encore une fois, ces courbes supposent que les apports sont suffisants. Cependant, contrairement à la courbe de tarage pour le site de Beaumont-Monteux, une grande partie des points expérimentaux sont cohérents avec le débit et semblent indiquer que la capacité de transport était atteinte. La courbe de capacité de transport par charriage indique toutefois des valeurs environ 4 fois supérieures aux points expérimentaux alors que la courbe de capacité de transport en suspension indique des valeurs 2 à 3 fois inférieures aux points expérimentaux.

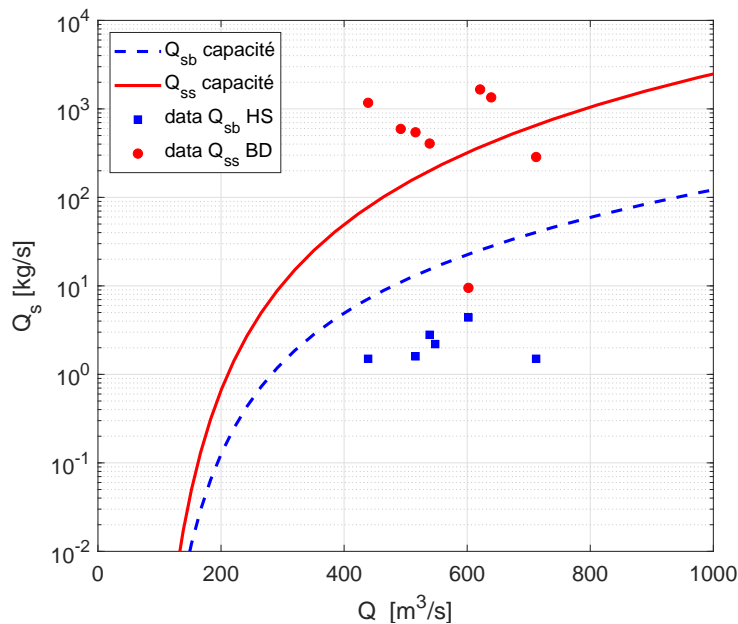


FIGURE 4.16 – Comparaison entre les courbes de capacité de transport et les mesures de charriage et suspension au niveau du pont Vélo-Route.

En corrigeant les flux solides estimés par ces capacité de transport, nous avons pu évaluer la dynamique temporelle des flux solides sur l'évènement. Pour le charriage, nous avons utilisé un coefficient $\alpha_b = 0.1$ constant sur la période. Pour la suspension, nous avons utilisé un coefficient α_s variant de 0.01 hors évènement à 4 lors de la chasse (cf. Figure 4.17b). Sur la base de Camenen et al. (2019), une décroissance exponentielle de α_s est proposée pour la période de remplissage. Les résultats sont présentés Figure 4.17. Il nous a été ainsi possible d'évaluer les flux solides sableux par charriage et suspension lors de l'évènement : $M_{sb,VR} = 2.3 \times 10^3$ t et $M_{ss,VR} = 0.54 \times 10^6$ t. Nous retrouvons donc une suspension prédominante sur le charriage mais la faible valeur du charriage peut être liée aux erreurs de mesure liés à un colmatage trop important du filet. Au final, nous retrouvons un transport sableux 3 fois plus faible que l'estimation faite au barrage de Beaumont-Monteux. Ceci peut s'expliquer à partir des dépôts observés sur la partie aval de l'Isère lors de l'évènement.

De manière similaire que pour Beaumont-Monteux, il est possible de faire une seconde évaluation du flux solide en combinant mesures et modèle avec une prise en compte d'un diamètre médian des sédiments variable en temps sur la base des résultats Figure 4.10b. Du fait de la variabilité plus faible de la granulométrie à pont Vélo-Route par rapport à Beaumont-Monteux, l'impact de sa prise en compte est moins forte. Cependant, le d_{50} globalement plus fin que $d_{50} = 0.15$ mm a impliqué un recalage de α_b et α_s . Au final, nous retrouvons des flux solides sableux par charriage et suspension lors de l'évènement un peu plus élevée qu'avec une granulométrie fixée : $M_{sb,VR} = 2.7 \times 10^3$ t et $M_{ss,VR} = 0.72 \times 10^6$ t.

Encore une fois, ces deux calculs (en prenant en compte ou non un diamètre médian variable en temps) donnent une indication des incertitudes sur l'évaluation des flux liés à l'évènement à partir d'un modèle calé sur un nombre limité de mesures.

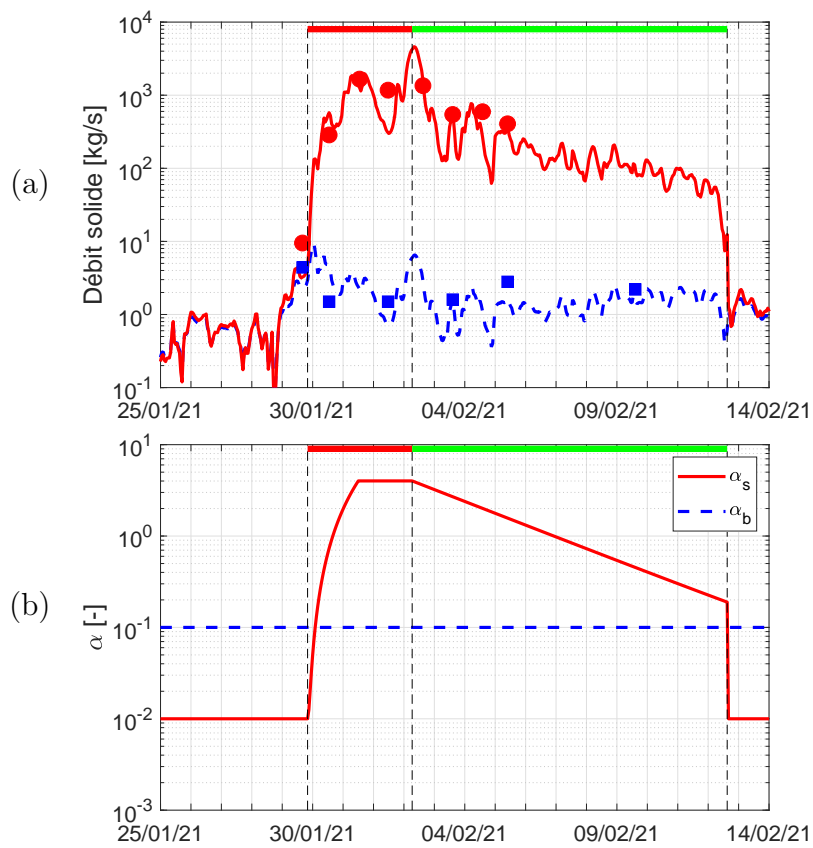


FIGURE 4.17 – Chronique des débits solides par charriage et suspension calés sur les mesures de charriage et suspension au niveau du pont Vélo-Route (a) et coefficient de calage des formules de capacité α_b et α_s correspondants (b).

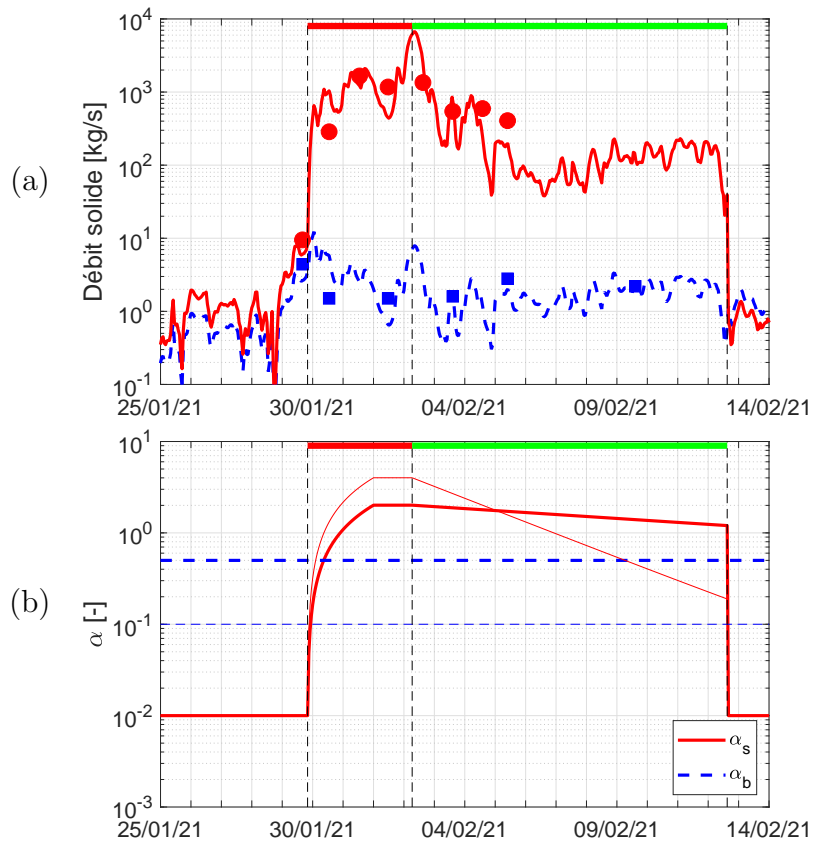


FIGURE 4.18 – Chronique des débits solides par charriage et suspension calés sur les mesures de charriage et suspension au niveau du pont Vélo-Route en supposant une granulométrie variable dans le temps (a) et coefficients de calage des formules de capacité α_b et α_s correspondants (en trait fin sont présentés les coefficients de calage de la Fig. 4.17) (b).

Chapitre 5

Évolutions bathymétriques et bilans sédimentaires

5.1 Évolutions bathymétriques dans les retenues de la Basse-Isère

Une estimation des stocks de sédiments peut être faite sur la base de données bathymétriques et des flux mesurées aux stations de références (Tullins, Fauries et Beaumont-Monteux). Si les données bathymétriques permettent d'évaluer un volume de sédiments stockés par rapport à une bathymétrie de référence (à vide), elles ne sont pas réalisées assez régulièrement pour avoir une vision globale des stocks érodés et déposés à une date donnée. Il est cependant possible d'évaluer les flux déposés sur la base des mesures de flux aux trois stations de référence en faisant une hypothèse de masse volumique des dépôts. Le Tableau 5.1 indique les principaux résultats ; les bathymétries ont été réalisées courant 2020 et complétées par les données de flux jusqu'au début 2021.

TABLE 5.1 – Stocks de sédiments dans les retenues de la Basse-Isère sur la base d'une bathymétrie de référence (à vide).

Barrage	Données bathymétriques	Données bathy. + flux
Beauvoir	$2.00 \times 10^6 \text{ m}^3$	} $3.10 \times 10^6 \text{ m}^3$
Saint-Hilaire	$0.60 \times 10^6 \text{ m}^3$	
Pizançon	$0.70 \times 10^6 \text{ m}^3$	
La-Vanelle	-	} $1.55 \times 10^6 \text{ m}^3$
Beaumont-Monteux	-	
total	$\approx 3.5 \times 10^6 \text{ m}^3$	$\approx 4.7 \times 10^6 \text{ m}^3$

5.2 Évolutions bathymétriques à la confluence Isère-Rhône

5.2.1 Aval Isère

Plusieurs levés bathymétriques sur l'aval de l'Isère sont disponibles sur la période entourant la chasse de janvier 2021. Deux levés bathymétriques complets (réalisés avec le Frédéric Mistral) sont disponibles au 20 juillet 2020 et 15 mai 2021. Il existe de plus des levés partiels (DT) les 3 et 5 février 2020, et les 6 janvier, 8 et 16-17 février 2021. Enfin, un levé partiel (EDF) a été réalisé le 12 mai 2021.

Suite à la chasse de janvier-février 2021, on observe d'importants dépôts sur l'aval de l'Isère juste en amont de la confluence (Fig. 5.1) avec un volume total déposé estimé à $0.50 \times 10^6 \text{ m}^3$.



FIGURE 5.1 – Différence (dépôt) entre les bathymétries du 06/01/2021 et du 16/02/2021 sur l'Isère de Beaumont-Montoux à la confluence avec le Rhône.

Ces dépôts ont été repris par la suite en particulier lors de la crue de mai 2021. Suite à cet événement, on observe en effet une forte érosion des dépôts initialement déposés après la chasse (Fig. 5.2) avec un volume total érodé estimé à $0.26 \times 10^6 \text{ m}^3$.

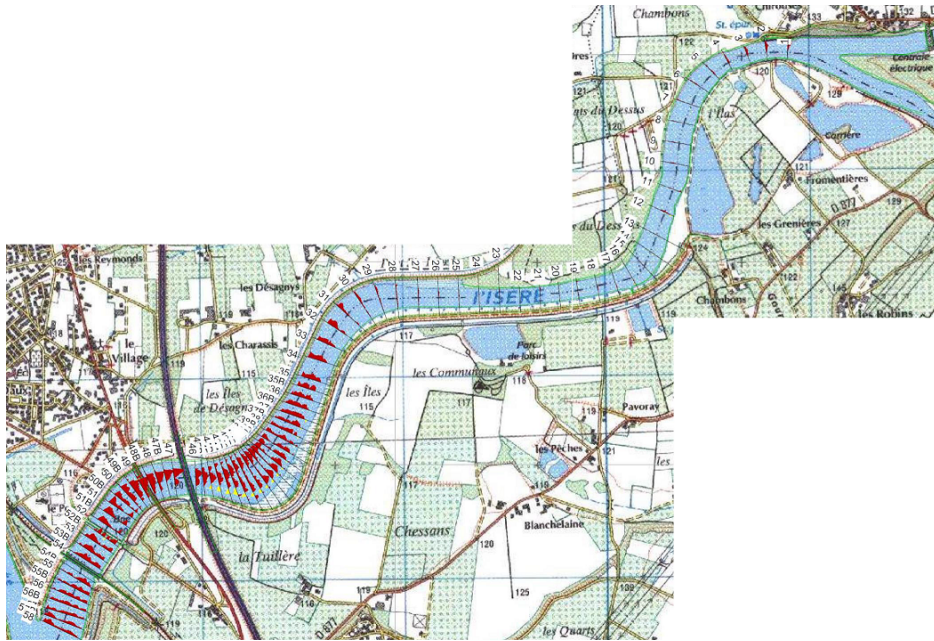


FIGURE 5.2 – Différence (érosion) entre les bathymétries du 16/02/2021 et 18/05/2021 sur l'Isère de Beaumont-Monteux à la confluence avec le Rhône (dégradé de couleur allant du vert foncé pour une forte érosion au marron foncé pour un fort dépôt).

5.2.2 Canal d'amenée

Concernant le canal d'amenée, il existe quatre levés bathymétriques complets (réalisés avec le Frédéric Mistral) les 23 juillet 2020, 10 et 23 février 2021 et 19 mai 2021 ainsi qu'une dizaine de levés partiel (DT).

La Figure 5.3 présente les évolutions bathymétriques dans le canal d'amenée entre le 27/07/2020 et le 23/02/2021. Les principales zones de dépôt ($> +1$ m) sont la partie aval Isère (comme discuté précédemment), le garage à bateaux mais aussi en rive droite du canal juste à l'amont du barrage Isère. Il est à noter aussi une forte érosion (≈ -3 m) à la confluence Isère-Rhône juste après l'épi immergé.

La Figure 5.4 présente les évolutions bathymétriques dans le canal d'amenée entre le 23/02/2021 et le 19/05/2021. La forte érosion observée dans le garage à bateau (≈ -3 m) est due à un dragage réalisé au printemps. Sinon, nous pouvons observer un transfert de matière vers l'aval sans doute du fait principalement de la crue de l'Isère en mai 2021. Ainsi l'érosion de la partie aval de l'Isère (≈ -2 m) semble avoir comblé, voire créé un dépôt à la confluence Isère-Rhône juste après l'épi immergé ($\approx +4$ m). Le dépôt en rive droite du canal s'est légèrement propagé vers l'aval et s'est renforcé du fait

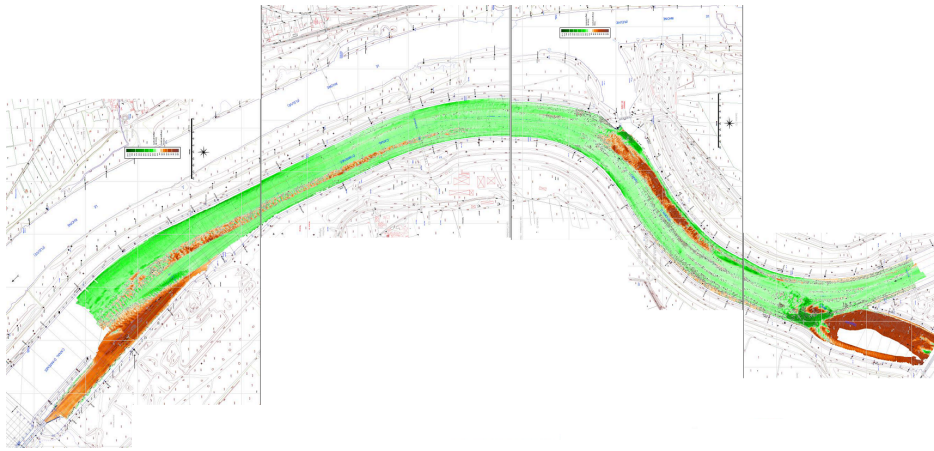


FIGURE 5.3 – Différence (dépôt) entre les bathymétries du 27/07/2020 et du 23/02/2021 dans le canal d’amenée.

des apports de l’Isère ($\approx +3$ m).

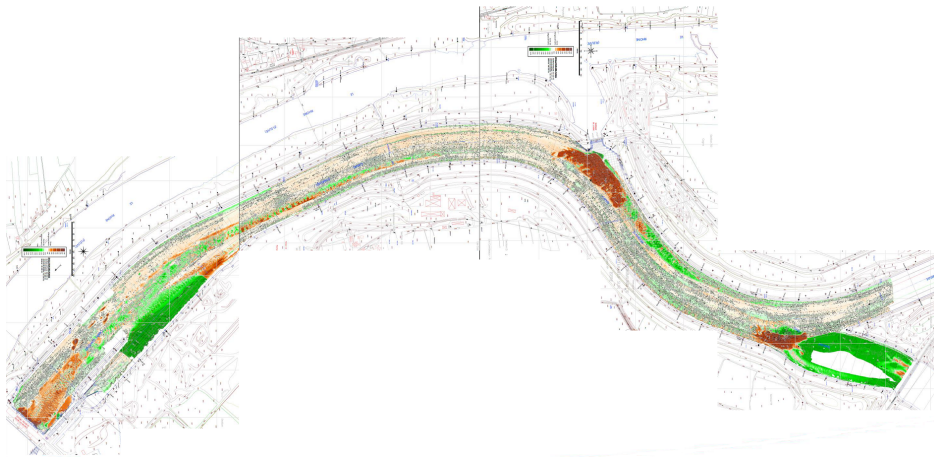


FIGURE 5.4 – Différence (érosion) entre les bathymétries du 23/02/2021 et 19/05/2021 sur l’Isère de Beaumont-Monteux à la confluence avec le Rhône.

5.3 Bilan sédimentaire sur la chasse de 2021

5.3.1 Bilan global

Le Tableau 5.2 présente un bilan des mesures réalisées pour évaluer les stocks de fines et sables remobilisés lors de l’évènement de janvier-février

2021. Il est à noter que pour l'estimation à Beaumont-Monteux avec la station turbidité, le coefficient de 1.4 n'a pas été affecté comme avec l'ISCO. Ceci peut partiellement expliquer les différences.

Sur la base des mesures de flux à Tullins et à Beaumont-Monteux (barrage et traillé), entre 2.9×10^6 t et 3.6×10^6 t de sédiments ont été évacués lors des chasses de barrage. La proportion de sable sur cette masse serait proche de 50% si l'on considère les mesures au barrage de Beaumont-Monteux, proche de 40% si l'on considère le modèle calé aux mesures de la traillé de Beaumont-Monteux. A partir des différentes estimations des flux de sable à Beaumont-Monteux lors de cet évènement de chasse, nous pouvons évaluer ce dernier à $1.5 \pm 0.3 \times 10^6$ t.

On note de même un dépôt entre 0.4×10^6 t et 1.1×10^6 t de sable sur la partie aval de l'Isère. Ceci est en accord avec les mesures bathymétriques avec un volume total déposé estimé à 0.50×10^6 m³, soit en supposant une porosité de 0.4 une masse déposée de 0.8×10^6 t. De la même manière, les mesures de flux indiquent un volume de dépôt négligeable dans le canal d'aménée comme observé par les mesures bathymétriques.

TABLE 5.2 – Bilan sédimentaire de la chasse de la Basse-Isère de janvier-février 2021.

Site	Flux fines	Flux sables
Tullins	0.1×10^6 t	0
Beaumont-Monteux (barrage)	1.9×10^6 t	1.7×10^6 t
Beaumont-Monteux (station turbidité)	1.8×10^6 t	1.1×10^6 t
Beaumont-Monteux (ISCO)	-	1.5×10^6 t
Beaumont-Monteux (prélèvements + modèle d fixe)	-	1.2×10^6 t
Beaumont-Monteux (prélèvements + modèle d var.)	-	1.7×10^6 t
Aval Beaumont-Monteux (masse déposée)	-	0.8×10^6 t
Pont Vélo-Route (prélèvements + modèle d fixe)	-	0.6×10^6 t
Pont Vélo-Route (prélèvements + modèle d var.)	-	0.7×10^6 t
Rhône (barrages Isère et BLV)	2.4×10^6 t	0.7×10^6 t

Nous pouvons noter aussi une différence non-négligeable sur le bilan entre Beaumont-Monteux et le Rhône (barrages Isère et BLV) concernant la fraction fine. Une différence de 0.6 Mt est en effet observée. Nous estimons que le Rhône amont a dû apporter sur la période environ 0,3 Mt (calcul fait avec les données mesurées au point R1 et le débit sur le canal d'aménée amont). Les 0,3 Mt manquants dans ce bilan sont à mettre sur le compte des incertitudes de mesure au barrages Isère et de Bourg-lès-Valence (représentativité des échantillons sur la section de mesure, fréquence d'échantillonnage relativement faible).

5.3.2 Évolution temporelle du dépôt

Naudet et al. (2017) ont montré qu'une relation existe entre le volume total du dépôt sur la partie basse de l'Isère à l'amont de la confluence (Figure 5.1) et les sections solides en aval, tout particulièrement pour les profils P49 et P55. Comme le niveau d'eau est directement contrôlé (et maintenu quasi constant) par la barrage de Bourg-lès-Valence, cette relation est aussi valable pour les sections mouillées. Même si le modèle pourrait être affiné avec un jeu de données plus grand, nous obtenons une relation intéressante :

$$V_{dep} = a_V + b_V S_m \quad (5.1)$$

avec V_{dep} le volume des dépôts, S_m la section mouillée moyenne entre les profils P55 et P49, et $a_V = 2.15 \times 10^6 \text{ m}^3$ et $b_V = -2500 \text{ m}$ les coefficients de calage.

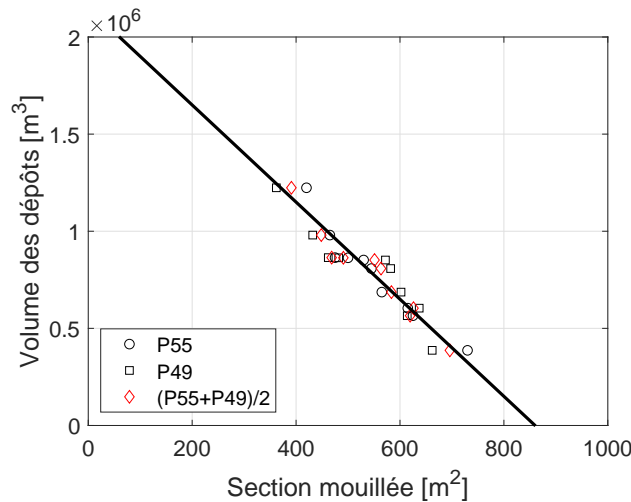


FIGURE 5.5 – Relation entre les sections mouillées des profils P49 et P55 et le volume total des dépôts sur l'Isère en amont immédiat de la confluence avec le Rhône.

De la même manière, il est possible d'évaluer le dépôt en calculant la différence entre les flux amont (à Beaumont-Montoux) et aval (au pont Vélo-Route) tel que :

$$V_{dep,\Phi}(t) = \frac{1}{\rho_s(1-p)} \int_{t=0}^t (Q_{s,am}(t) - Q_{s,av}(t)) dt \quad (5.2)$$

avec $p = 0.4$ la porosité du dépôt, $\rho_s = 2650 \text{ m}^3/\text{s}$ la masse volumique des sédiments et $Q_{s,am}$ et $Q_{s,av}$ les flux solide estimés à l'amont et à l'aval à

partir du modèle calé sur les mesures (cf. section 4.4). Ce calcul a donc pu être fait en considérant un diamètre médian constant ou variable (Fig. 5.6). On confirme qu'il existe une incertitude importante sur l'évaluation des flux et donc sur le volume déposé à partir de ces flux. Cependant, la dynamique de formation du dépôt semble bien reproduite par la méthode des flux à un facteur près.

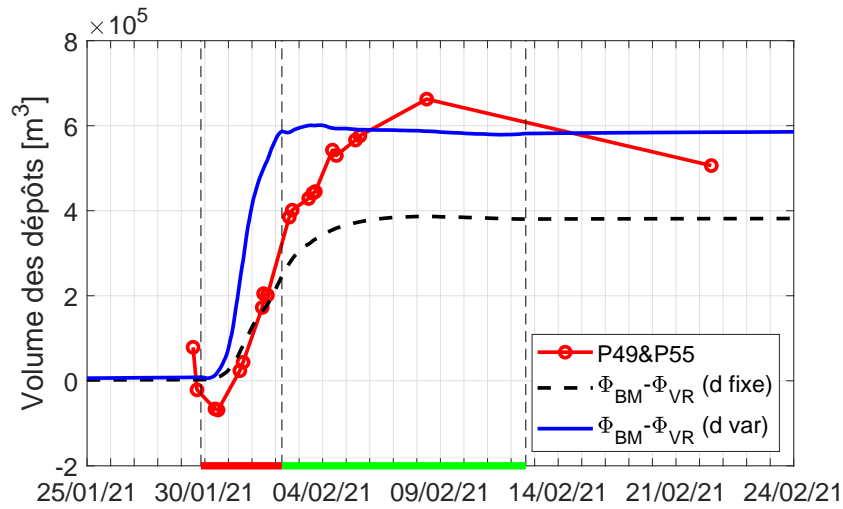


FIGURE 5.6 – Évolution du volume total des dépôts sur l'Isère en amont immédiat de la confluence avec le Rhône estimé à partir des sections mouillées (Eq. 5.1) ou des flux de sédiments (Eq. 5.2).

Chapitre 6

Conclusion

Il est à souligner qu'au début de l'année 2021, les conditions de travail étaient fortement perturbées par la pandémie de Covid. Les consignes de sécurité et de prévention mises en place par les différents acteurs de ces essais ont été bien respectées et aucun "cluster" n'est à déplorer malgré la présence de nombreux agents se relayant sur les différents postes de travail. L'effort de mesure déployé a été considérable pendant cet événement. L'exploitation des données, l'analyse des échantillons a également nécessité des investissements importants des différents partenaires. Il ressort de cette étude un jeu de données unique et très riche qui nécessitera encore de nombreux mois de travail pour en tirer toutes les conclusions. Ce suivi intense apporte des informations très riches sur la dynamique des sédiments et du sable en particulier sur ce secteur.

6.1 Bilan des mesures

Les mesures par pompage au niveau du barrage de Beaumont-Montoux se sont avérées extrêmement intéressantes car elles permettent de manière relativement aisée d'avoir une vision temporelle des apports en sable. Il serait cependant utile de vérifier l'homogénéité des concentrations sur la section du barrage en effectuant des mesures complémentaires à d'autres positions. Une conclusion identique peut être faite pour les mesures aux barrages Isère et de Bourg-lès-Valence. Aussi, il apparaît très important d'accroître la fréquence des mesures lors de la période de la chasse où les concentrations sont élevées et potentiellement très variables : une fréquence horaire serait idéale.

Les mesures de flux de sable par exploration d'une section de rivière restent complexes et incertaines. Mais l'utilisation de préleveurs isocinétiques est possible sur les trilles hydrométriques ; c'est d'ailleurs actuellement l'une des

seules possibilités d'effectuer des mesures de concentration distribuées dans la section sur ces équipements dans des conditions de chasse ou de crue. La bouteille de Delft apparaît comme l'appareil le plus robuste car moins sensible aux débris du fait d'une ouverture de buse plus grande. Il existe cependant une potentielle sous-estimation par perte de particules qui mériterait d'être mieux évaluée (Beverage & Williams 1989). A l'inverse, le préleveur US-P72 ne semble pas très adapté pour les conditions de l'Isère en chasse même si les résultats obtenus restent cohérents. L'utilisation d'un préleveur mieux adapté aux écoulements observés (US-P06, prêté ponctuellement à partir de juin 2021 par l'université de Tours) permettrait de réduire les incertitudes, au moins en termes de stabilité, et d'affiner la compréhension de la répartition des concentrations dans la section. Cependant, des risques d'obstruction de la buse du fait des débris restent important. Un gros point négatif du préleveur US-P72 est qu'après vérification auprès de spécialistes américains, il semble que ce préleveur (acheté en 2017 par INRAE) n'ait pas été calibré en laboratoire comme c'est prévu pour chacun des préleveurs de ce type ; cette information n'était pas connue début 2021. L'US-P72, après recalibration pourrait être utilisé préférentiellement au pont Vélo-Route depuis la cyclopotence CNR par exemple ou un camion jaugeur d'EDF DTG car les conditions d'écoulement lui seraient plus favorables. Des prélèvements intégrés sur la verticale pourraient aussi permettre de limiter le nombre d'échantillons pendant les jaugeages solides distribués tout en donnant une bonne représentativité (achat d'un préleveur Nilsson en cours à INRAE). Les prélèvements par pompage distribués sont à réitérer pour évaluer leur représentativité et leur potentiel pour estimer les flux de sable. Il faudra cependant bien faire attention à respecter l'échantillonnage iso-cinétique avec une bonne maîtrise de la vitesse de pompage.

Les mesures ADCP sont indispensables pour obtenir une bathymétrie et des champs de vitesse, ces données sont importantes pour affiner les calculs des jaugeages solides, appréhender le fond mobile et comprendre la répartition des sédiments dans la section. L'utilisation d'un ADCP 300 kHz est extrêmement utile, il est important de souligner l'intérêt de maintenir un tel équipement opérationnel malgré les difficultés de mise en œuvre, l'équipe du CACOH est la seule en France à déployer un tel instrument en rivière, c'est une chance de pouvoir profiter de ces données pour cette étude et pour toutes les mesures en situation de crue avec fortes charges sédimentaires. Des post-traitements des données ADCP sont encore en cours et permettront d'affiner et de réduire les incertitudes sur les calculs de flux.

Une corrélation très intéressante est apparue entre la concentration en sable mesurée en berge avec le préleveur ISCO et la concentration moyenne sur la section issue de l'exploration spatiale avec le préleveur US-P72. Il serait

donc possible d'utiliser la méthode de la concentration témoin (Santini et al. 2019) pour évaluer la concentration moyenne sur la section et donc les flux de sable. Même si cette relation mérite d'être confirmée, elle pourra à terme permettre d'évaluer les flux de sable sur la station de Beaumont-Monteux de manière relativement simple (de façon similaire aux mesures de pompage sur le barrage de Beaumont-Monteux). En ce sens, multiplier des préleveurs automatiques est sans doute une solution à envisager pour les prochaines campagnes de ce type, en positionnant éventuellement des buses et tuyaux avant les événements. Cette observation est aussi de bonne augure quant au projet d'installation d'une station hydro-acoustique à Beaumont-Monteux pour la mesure en continu des sables même si les concentrations en fines induiraient une forte atténuation. Il faudrait sans doute utiliser des HADCP de fréquence relativement basse, soit 300 kHz et 600 kHz.

La calibration d'un turbidimètre sur la base de la fraction fine semble robuste et permet donc une très bonne estimation des flux de MES (sables exclus). Il est aussi possible de réaliser une seconde calibration sur la base des concentrations totales mesurées en berge. Cela peut ainsi permettre d'avoir une évaluation grossière des flux de sables. Cette évaluation est cependant à prendre avec beaucoup de précautions car la calibration de la turbidité aux concentrations totales reste très incertaine.

6.2 Bilan de la dynamique sédimentaire

A la trille de Beaumont Monteux, les sédiments fins arrivent le 30/01 et leur concentration augmente progressivement comme la concentration en sable. Le 01/02 on atteint les concentrations maximales (en fine et sable). La majeure partie du flux va passer sur les deux premiers jours de février. Le d_{50} du sable est de 110 μm en moyenne le 01/02, ce d_{50} va augmenter progressivement jusqu'au 04/02 (260 μm) alors que les concentrations baissent. La baisse de concentration en fines est plus rapide et précède la baisse de concentration en sable qui est plus lente. La conclusion principale est que le cours d'eau va évacuer en premier lieu un flux chargé de particules fines et que les particules les plus grosses vont être ralenties ou mobilisées par la suite.

Nous avons pu montrer que les flux évacués par les barrages de la Basse-Isère sont d'environ 3 millions de tonnes dont près de 50% de sable. Sur la base des estimations de flux et mesures bathymétrique, environ 0.8 millions de tonnes de sable (soit près de 50% du flux de sable à Beaumont-Monteux) se sont déposés sur la partie aval de l'Isère. Tout comme pour l'événement de 2015, ces dépôts se concentrent tout particulièrement sur les derniers 500 m

de l'Isère. Ceci confirme qu'une mesure régulière de la bathymétrie d'une section aval de l'Isère est un bon indicateur des flux de sable et surtout des dépôts globaux sur la partie aval. Du fait des débits assez élevés dans le Rhône, peu de dépôts ont été observés.

6.3 Perspectives

Dans la perspective d'une prochaine campagne de mesure de cette ampleur, quelques éléments sont à évoquer pour améliorer/compléter le suivi :

- Le prélèvement par pompage au barrage de Beaumont Monteux mériterait d'être doublé et pourrait être accompagné d'une augmentation de la cadence d'échantillonnage. L'analyse a posteriori de l'échantillon tamisé sur un gros volume serait d'ailleurs plus précise et plus rapide que l'analyse des flacons de 2l.
- Les concentrations en sable proche de la berge au niveau de la station de Beaumont-Monteux étant a priori fortement corrélées à la concentration moyenne sur la section, ce site est potentiellement adapté pour la mise en place d'une station hydro-acoustique si la station de Grenoble montre tout l'intérêt de cette méthode (thèse de J. Laible).
- Les mesures à la traîlle sont capitales, cet outil doit être maintenu et des agents formés à son utilisation. En effet les suivis sédimentaires de sable ne peuvent être automatisés sans effectuer régulièrement des campagnes de jaugeages solides depuis une traîlle ou un moyen mobile de prélèvement.
- Le travail sur les préleveurs de la charge en suspension est encore un sujet de recherche et de nouvelles comparaisons sont en cours pour valider leur utilisation dans ces conditions difficiles.
- Les jaugeages solides par pompage distribués sont une alternative intéressante qui mérite d'être testée de nouveau car cette méthode peut permettre des prélèvements distribués plus simples et plus rapides à mettre en oeuvre.
- Les mesures ADCP permettent d'affiner nos connaissances sur les écoulements, la combinaison des données ADCP avec les prélèvements ou l'utilisation des signaux acoustiques vont permettre de réduire les incertitudes sur les flux de sable.
- Les "Cacoh board" avec turbidimètre utilisées lors des APAVER pourraient être déployées sur le site de Vélo-Route pour permettre une mesure en continu des fines en sub-surface, des préleveurs automatiques pourraient également être utilisés pour la calibration de ces sondes turbidimétriques. Plusieurs profondeurs pourraient être explorées en

installant au préalable des tuyaux de préleveur au niveau des piles de pont par exemple.

- Travailler sur la stratégie d'analyse pourrait permettre d'optimiser les coûts des mesures de concentration et de granulométrie en laboratoire. Enfin les mesures et les estimations des flux charriés ont été très limitées sur cette campagne et sont peut être aussi un point d'amélioration possible pour confirmer ou affiner les estimations.

Remerciements

Nous remercions toutes les personnes ayant participé aux campagnes de mesure et aux analyses. Le travail des personnels d'INRAE a été en partie supporté par le projet OSR6 (Observatoire des Sédiments du Rhône).

Bibliographie

- Armijos, E., Crave, A., Espinoza, R., Fraizy, P., Dos Santos, A. L. M. R., Sampaio, F., De Oliveira, E., Santini, W., Martinez, J., Autin, P., Pantoja, N., Oliveira, M. & Filizola, N. (2017), ‘Measuring and modeling vertical gradients in suspended sediments in the solimões/amazon river’, *Hydrological Processes* **31**(3), 654–667.
- Beverage, J. P. & Williams, D. T. (1989), ‘Comparison - US P-61 and Delft sediment samplers’, *Journal of Hydraulic Engineering* **115**(2), 1702–1706.
- Camenen, B., Deville-Cavellin, L., Thollet, F., Bonnefoy, A., fretaud, T. & Pierrefeu, G. (2021), Evaluation d’une pompe péristaltique pour l’échantillonnage de suspension sableuse [evaluation of a peristaltic pump for sand suspension sampling], in ‘Hydrométrie 2021 : ”De la mesure à la prise de décision”’, Société Hydrotechnique de France’.
- Camenen, B., Holubová, K., Lukač, M., Le Coz, J. & Paquier, A. (2011), ‘Assessment of methods used in 1D models for computing bed-load transport in a large river : the Danube River in Slovakia’, *Journal of Hydraulic Engineering* **137**(10), 1190–1199.
- Camenen, B. & Larson, M. (2005), ‘A bedload sediment transport formula for the nearshore’, *Estuarine, Coastal & Shelf Science* **63**, 249–260.
- Camenen, B. & Larson, M. (2008), ‘A general formula for noncohesive suspended sediment transport’, *Journal of Coastal Research* **24**(3), 615–627.
- Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G., Peteuil, C., Fretaud, T., Falgon, A., Dussouillez, P. & Moore, S. A. (2014), A simple physically-based model for predicting sand transport dynamics in the Lower Mekong River, in A. J. Schleiss, G. de Cesare, M. J. Franca & M. Pfister, eds, ‘River Flow, Proc. 7th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics’, Lausanne, Switzerland, pp. 2189–2197.

- Camenen, B., Naudet, G., Dramais, G., Le Coz, J. & Paquier, A. (2019), ‘A multi-technique approach for evaluating sand dynamics in a complex engineered piedmont river system’, *Science Total Environment* **657**, 485–497.
- Dijkman, J. (1978), Some characteristics of USP-61 and Delft Bottle suspended sediment samplers, Technical report, Delft Univ. of Technology, The Netherlands. 211 p.
- Dijkman, J. (1981), Investigation of characteristic parameters of Delft Bottle, Technical Report S362, Delft Hydraulics Lab., The Netherlands.
- Dijkman, J. & Milisic, V. (1982), Investigations on suspended sediment samplers based on measurements in the Danube River, May 1979, Technical Report S410, Delft Hydraulics Laboratory and Jaroslav Cerni Institute, The Netherlands.
- Dramais, G., Camenen, B. & Le Coz, J. (2018), ‘Comparaison de méthodes pour la mesure des matières en suspension dans les cours d’eau en présence de sable [Methods comparison for river suspended sediment measurements containing sand]’, *La Houille Blanche* **5-6**, 96–105. (accepted).
- FISP (Federal Interagency Sedimentation Project) (1941), Study of methods used in measurement and analysis of sediment loads in streams : report 5 : laboratory investigations of suspended sediment samplers, Technical report, USACE / USGS / USDA / Iowa Institute of Hydraulic Research, Iowa University, Iowa. 100 p.
- Gray, J. & Landers, M. (2014), Measuring suspended sediment, in S. Ahuja, ed., ‘Comprehensive Water Quality and Purification’, Elsevier, chapter 4, pp. 159–204.
- Gray, J. R. & Gartner, J. W. (2009), ‘Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring’, *Water Resources Research* **45**(W00D29), 1–20.
- Kuhnle, R., Langendoen, E. & Wren, D. (2017), ‘Prediction of sand transport over immobile gravel from supply-limited to capacity conditions’, *Journal of Hydraulic Engineering* **143**(7), 1–8.
- Naudet, G., Camenen, B., Dugué, V. & Paquier, A. (2017), étude de la dynamique hydrosédimentaire au niveau de la confluence entre l’isère et le rhône (phase2) [hydro-sedimentary study of the isère - rhône confluence (phase 2)], Technical report, Irstea, EDF, CNR, Lyon, France. 134 p.

- Naudet, G., Dugué, V., Camenen, B., Le Coz, J., Dramais, G. & Paquier, A. (2016), étude de la dynamique hydrosédimentaire au niveau de la confluence entre l'isère et le rhône [hydro-sedimentary study of the isère - rhône confluence], Technical report, Irstea, EDF, CNR, Lyon, France. 112 p.
- Santini, W., Camenen, B., Le Coz, J., Vauchel, P., Guyot, J., Lavado, W., Carranza, J., Paredes, M. A., Pérez Arévalo, J. J., Arévalo, N., Espinoza Villar, R., Julien, F. & Martinez, J.-M. (2019), 'An index concentration method for suspended load monitoring', *Earth Surface Dynamics* **31**(3), 654–667.
- Soulsby, R. L. (1997), *Dynamics of marine sands, a manual for practical applications*, Thomas Telford, London, UK. ISBN 0-7277-2584 X.
- Soulsby, R. L. & Whitehouse, R. J. S. W. (1997), Threshold of sediment motion in coastal environment, *in* 'Proc. Pacific Coasts and Ports'97 Conf.', University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, pp. 149–154.

Annexe A

Graphiques complémentaires

A.1 Mesures ADCP

Nous présentons ici les résultats des jaugeages ADCP réalisés à Beaumont-Monteux (Fig. A.1) et au pont Vélo-Route (Fig. A.2) .

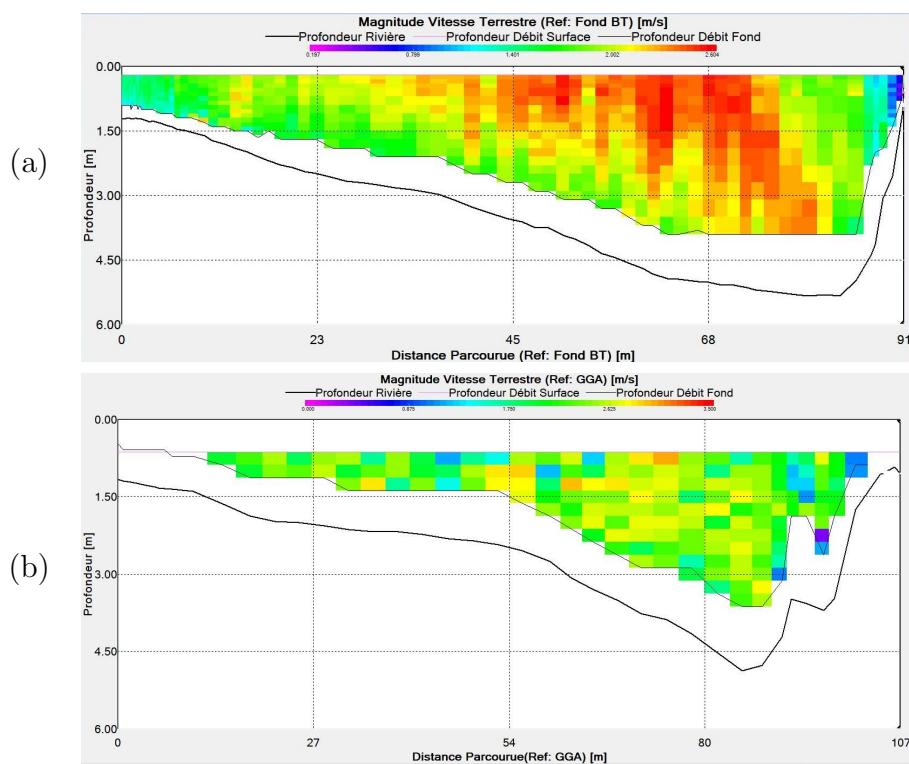


FIGURE A.1 – Jaugeages ADCP réalisés à Beaumont-Monteux les 29 janvier (a) et 4 février (b) 2021.

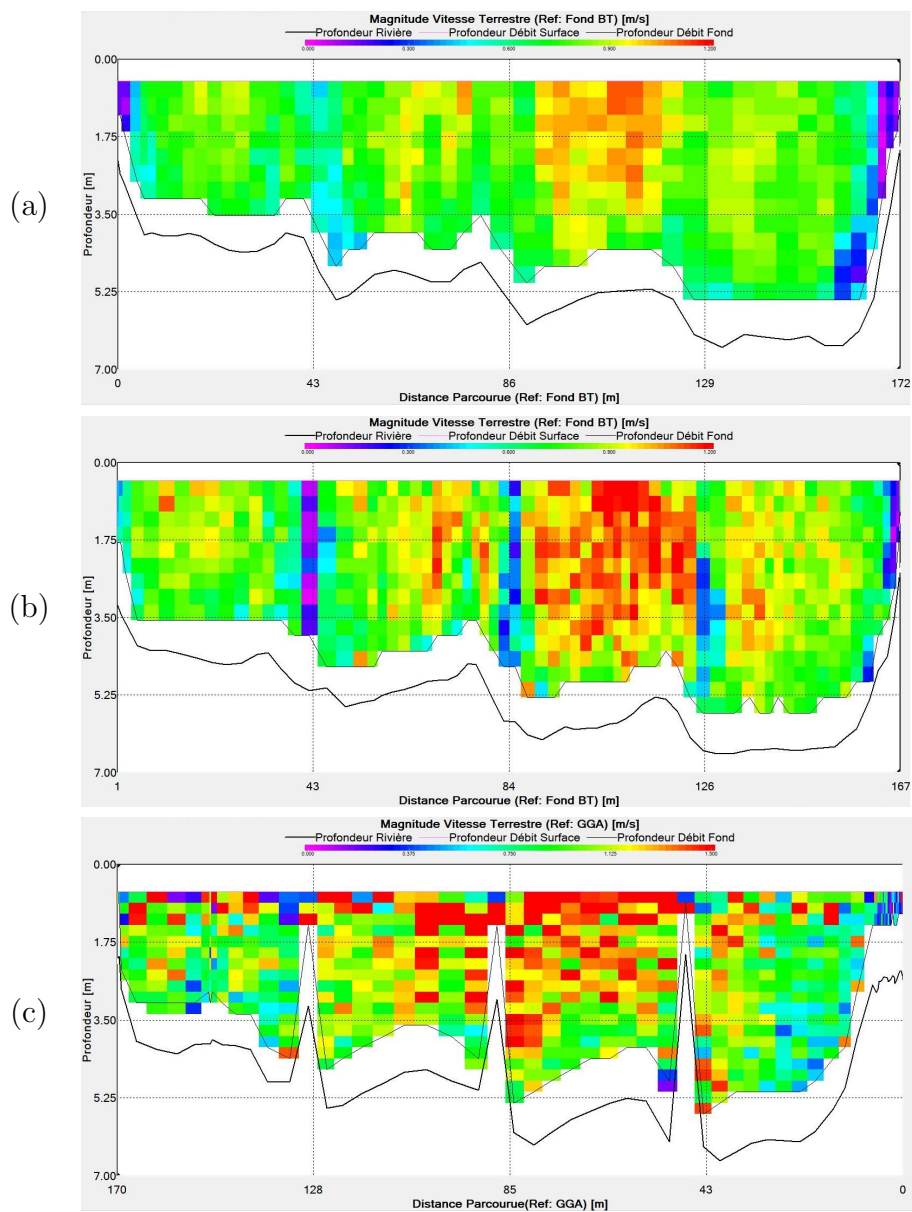


FIGURE A.2 – Jaugeages ADCP réalisés au pont Vélo-Route les 29 (a) 30 (b) et 31 (c) janvier 2021.

A.2 Représentation spatiale des mesures à la traîlle de Beaumont-Monteux

Nous présentons ici les résultats des prélèvements de suspension sur la section de mesure de Beaumont-Monteux

A.2.1 Concentrations mesurées avec la US-P72

Tout d'abord, les concentrations en fines et en sable à partir de prélèvements avec la P72 sont présentées, et ce ci pour chaque campagne de mesure. Lorsque cela a été possible, la concentration en sable (ou en fine, ou totale) mesurée à l'aide de l'ISCO en berge est présentée conjointement.

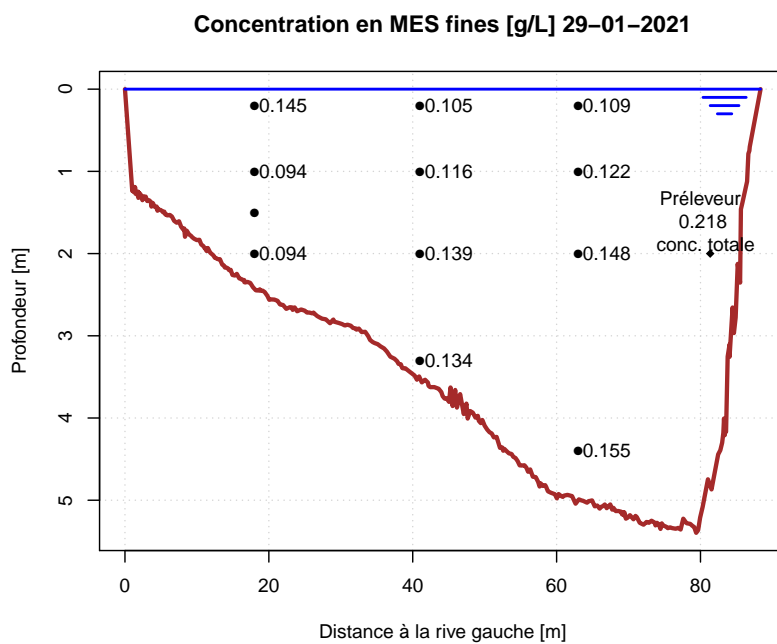
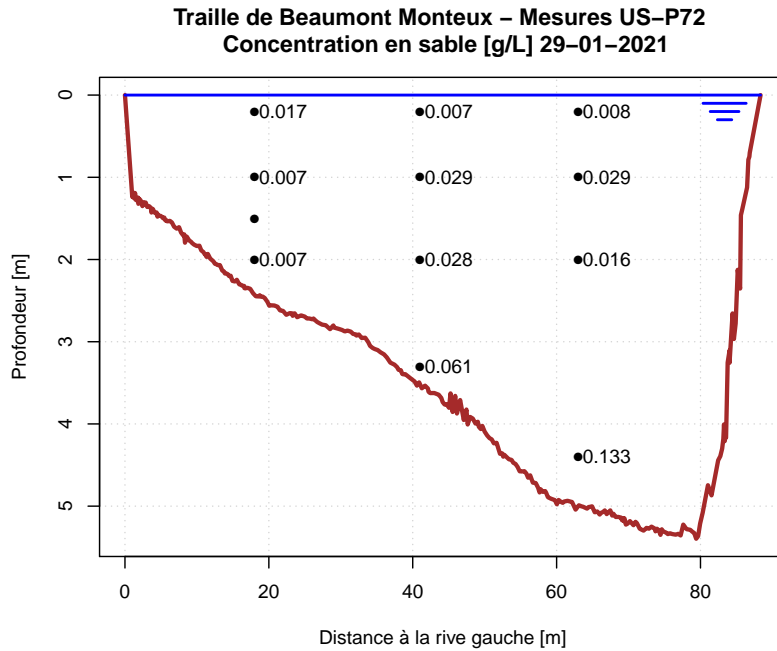


FIGURE A.3 – Concentrations en sable et en fines mesurées avec le préleveur US-P72 sur la section de la traille de Beaumont-Monteux lors de la campagne du 29 janvier 2021.

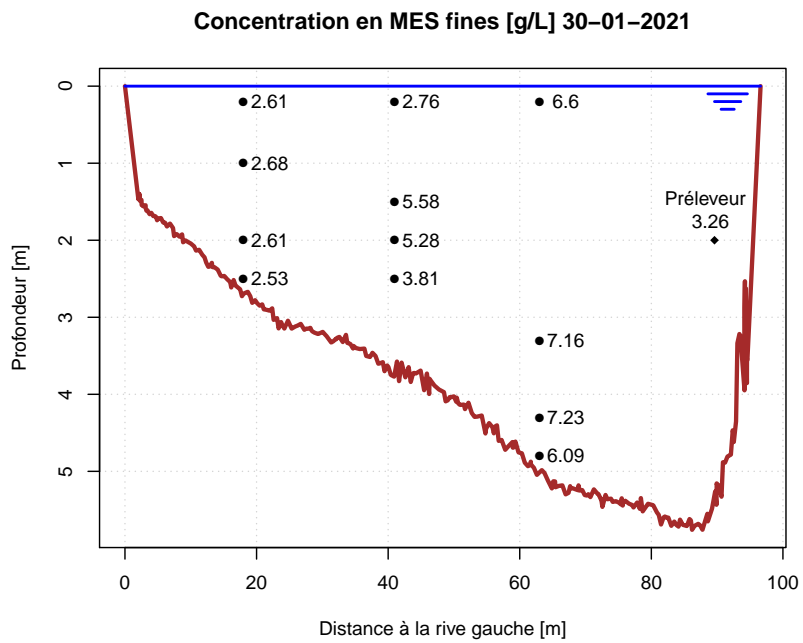
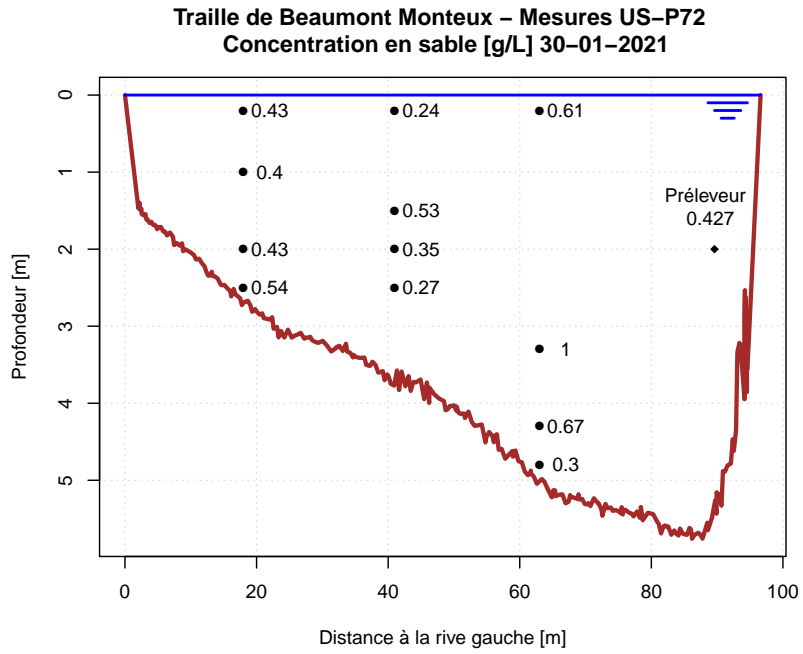


FIGURE A.4 – Concentrations en sable et en fines mesurées avec le préleveur US-P72 sur la section de la traille de Beaumont-Monteux lors de la campagne du 30 janvier 2021.

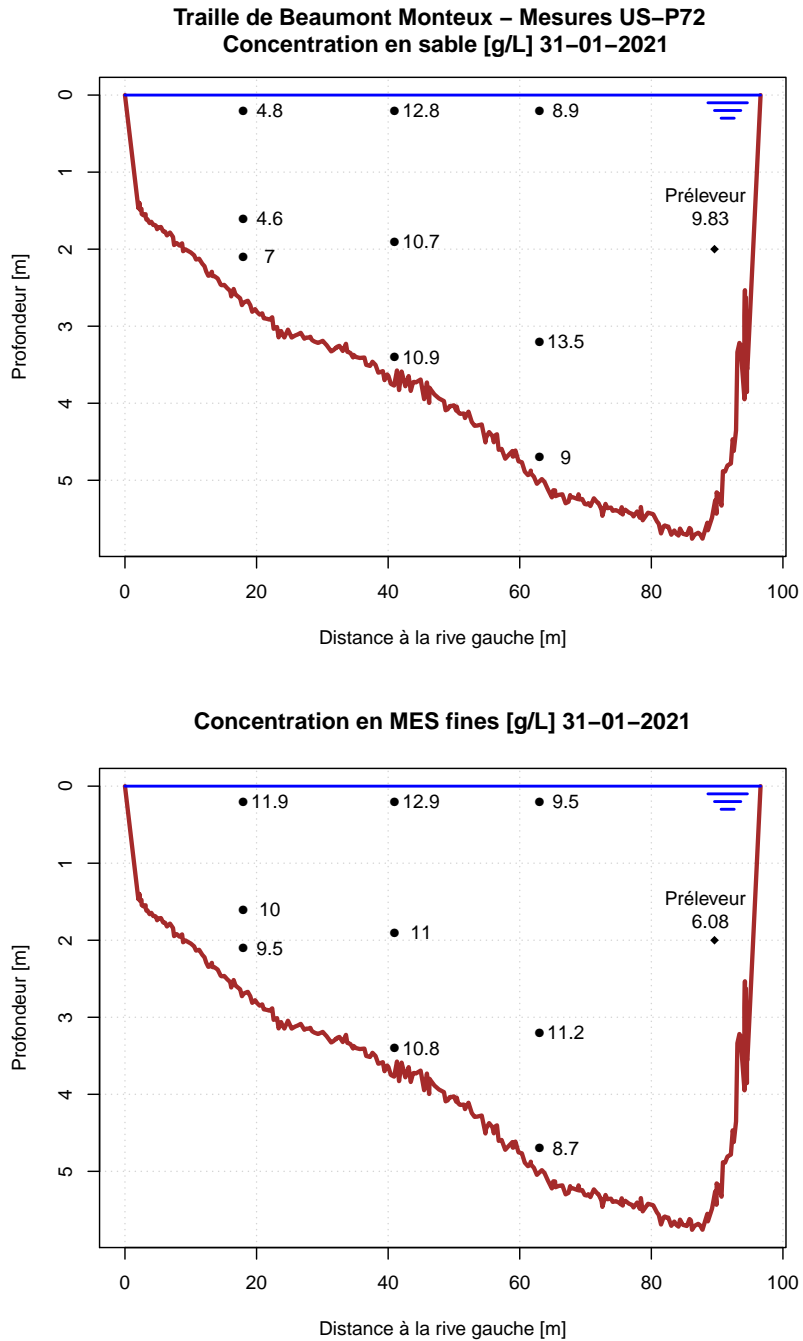


FIGURE A.5 – Concentrations en sable et en fines mesurées avec le préleveur US-P72 sur la section de la traille de Beaumont-Monteux lors de la campagne du 31 janvier 2021.

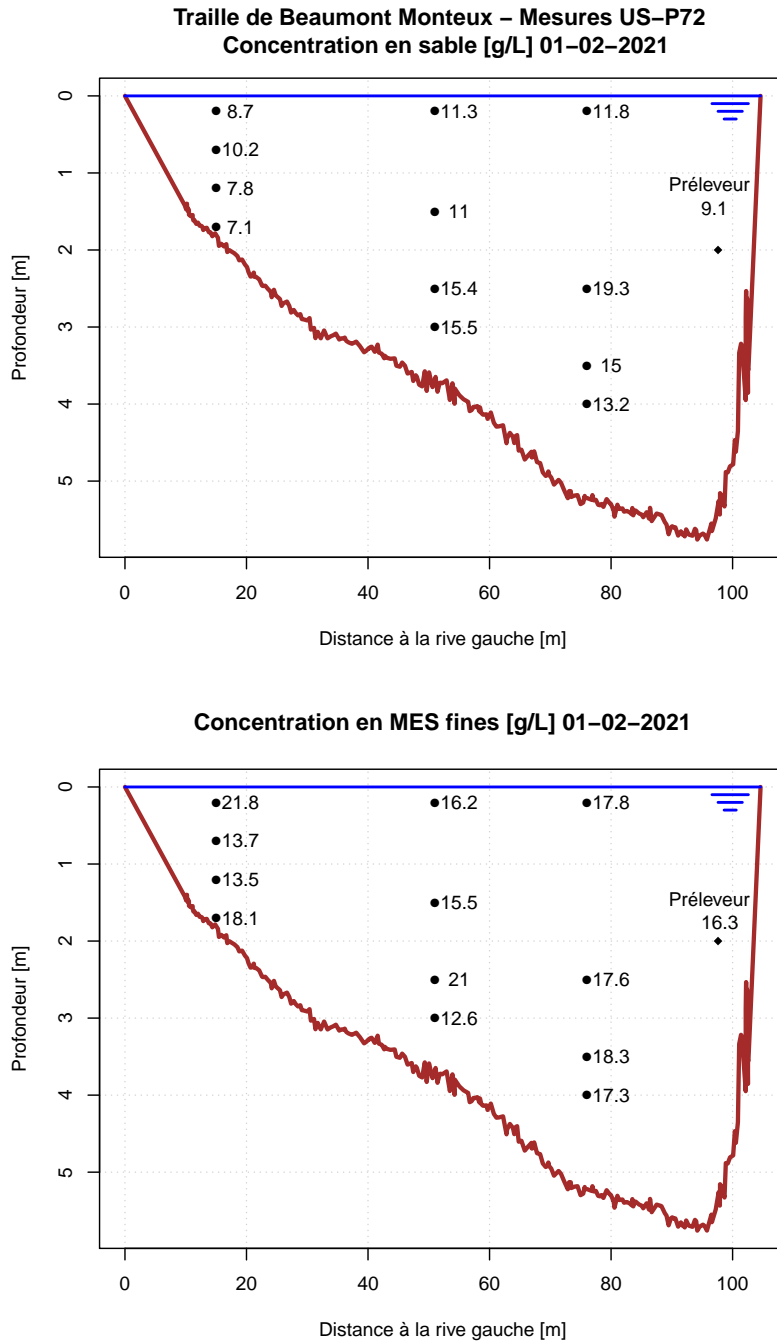


FIGURE A.6 – Concentrations en sable et en fines mesurées avec le préleveur US-P72 sur la section de la traille de Beaumont-Montoux lors de la campagne du 1er février 2021 au matin.

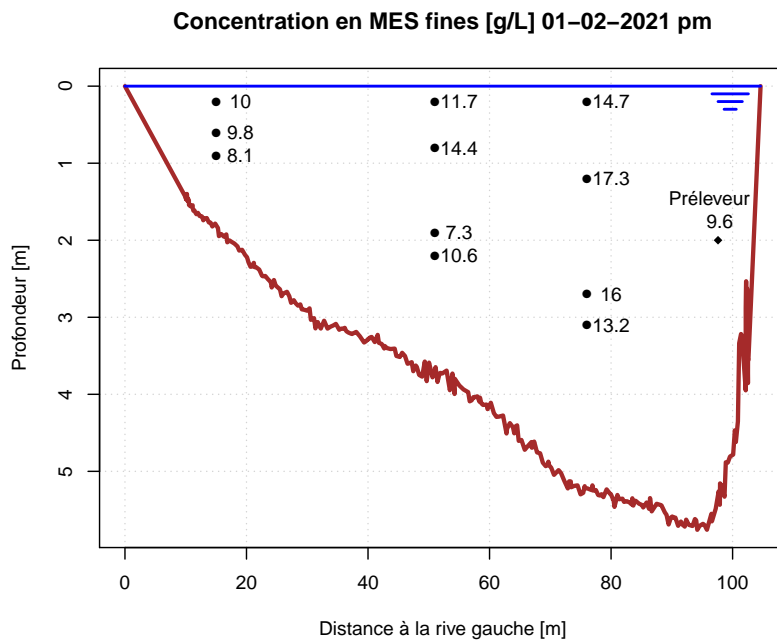
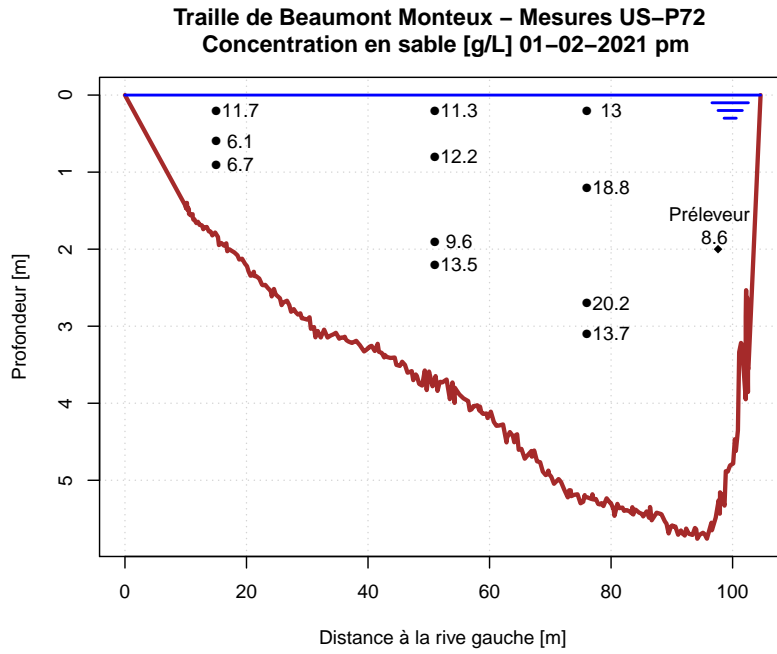


FIGURE A.7 – Concentrations en sable et en fines mesurées avec le préleveur US-P72 sur la section de la traille de Beaumont-Montoux lors de la campagne du 1er février 2021 dans l’après-midi.

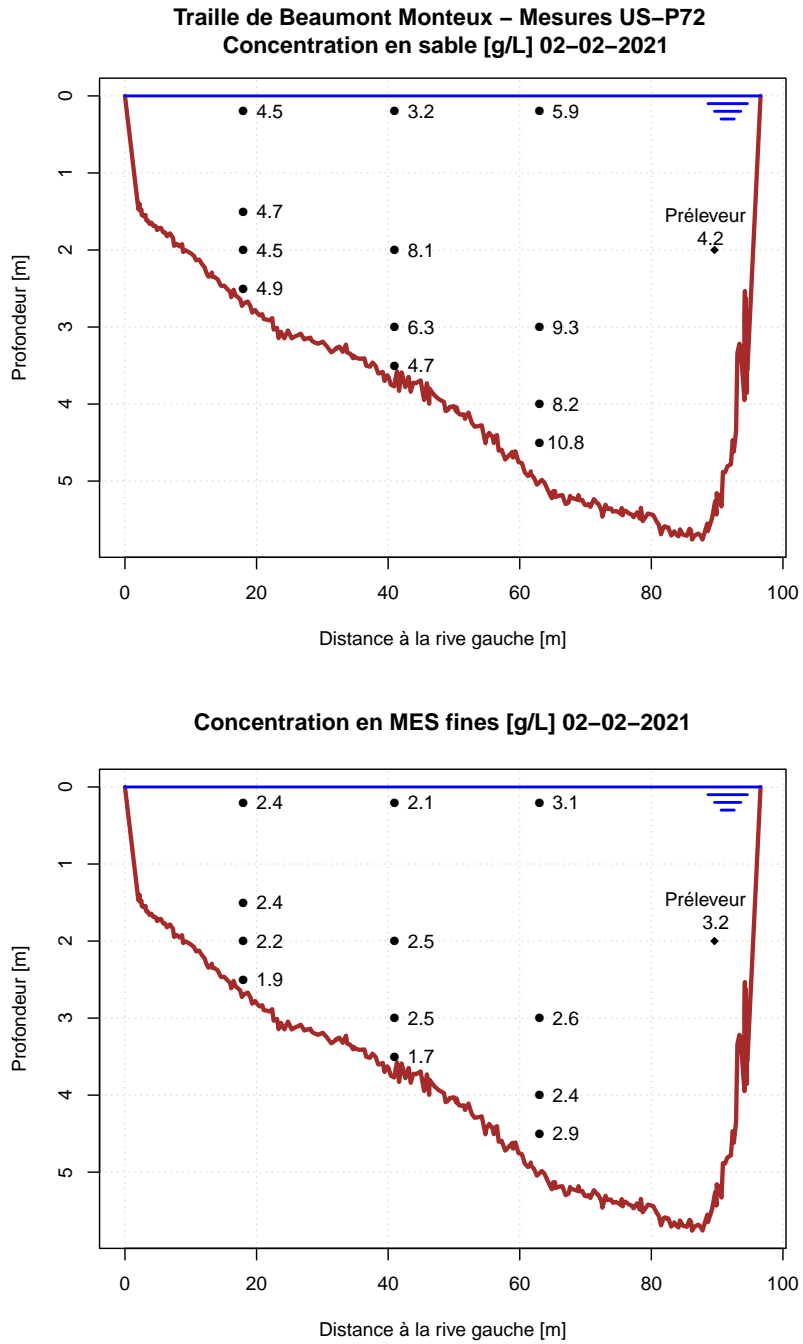


FIGURE A.8 – Concentrations en sable et en fines mesurées avec le préleveur US-P72 sur la section de la traille de Beaumont-Monteux lors de la campagne du 2 février 2021.

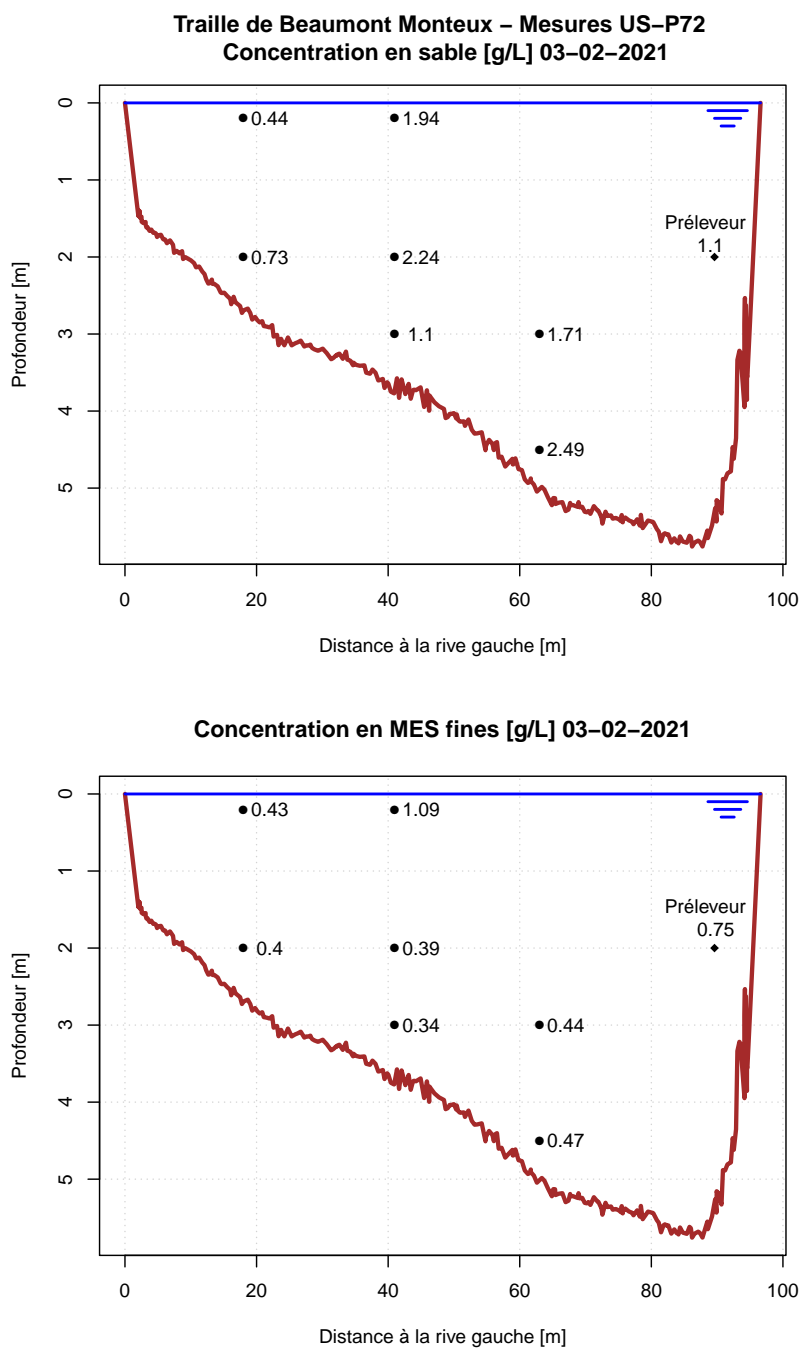


FIGURE A.9 – Concentrations en sable et en fines mesurées avec le préleveur US-P72 sur la section de la traille de Beaumont-Montoux lors de la campagne du 3 février 2021.

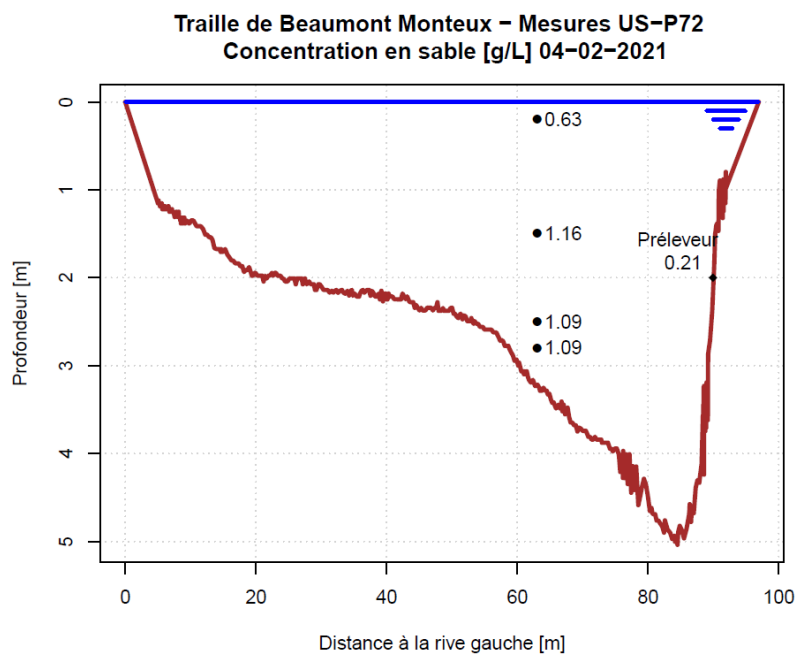


FIGURE A.10 – Concentrations en sable et en fines mesurées avec le préleveur US-P72 sur la section de la traille de Beaumont-Monteux lors de la campagne du 4 février 2021.

A.2.2 Flux mesurés avec la bouteille de Delft

Sont présentés ici les flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft à la traîlle de Beaumont-Monteux spatialisé sur la section de mesure.

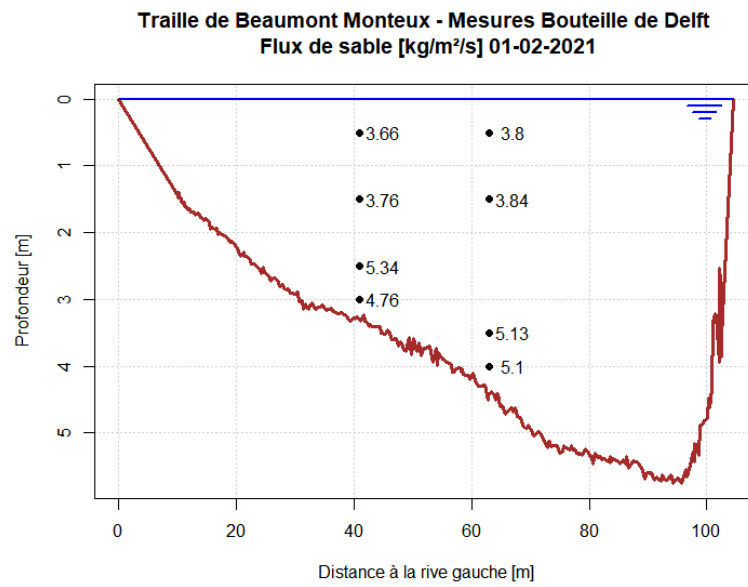


FIGURE A.11 – Flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft sur la section de la traîlle de Beaumont-Monteux lors de la campagne du 1er février 2021.

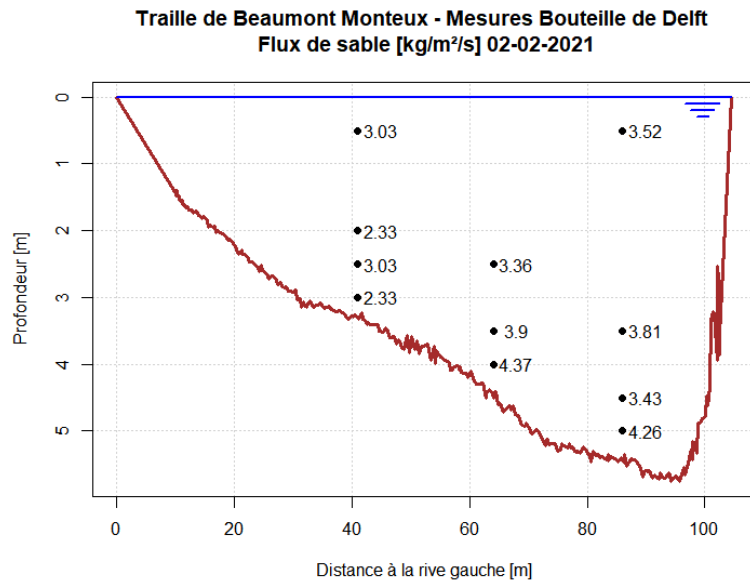


FIGURE A.12 – Flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft sur la section de la traille de Beaumont-Monteux lors de la campagne du 2 février 2021.

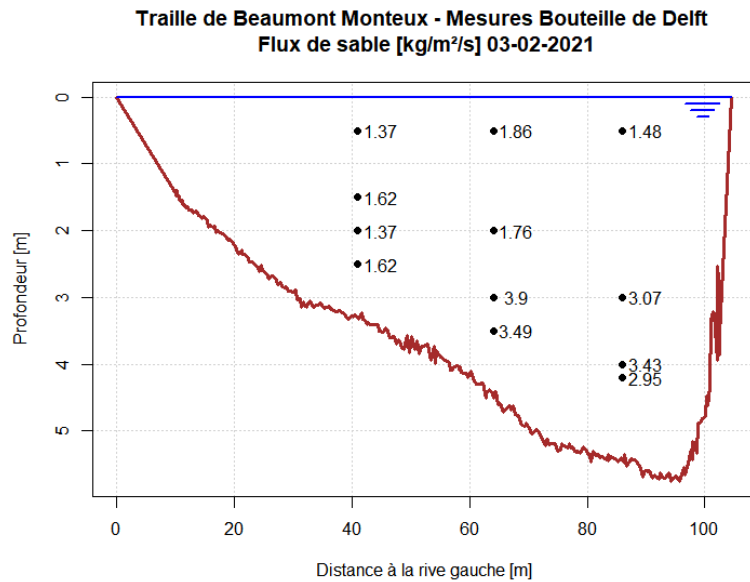


FIGURE A.13 – Flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft sur la section de la traille de Beaumont-Monteux lors de la campagne du 3 février 2021.

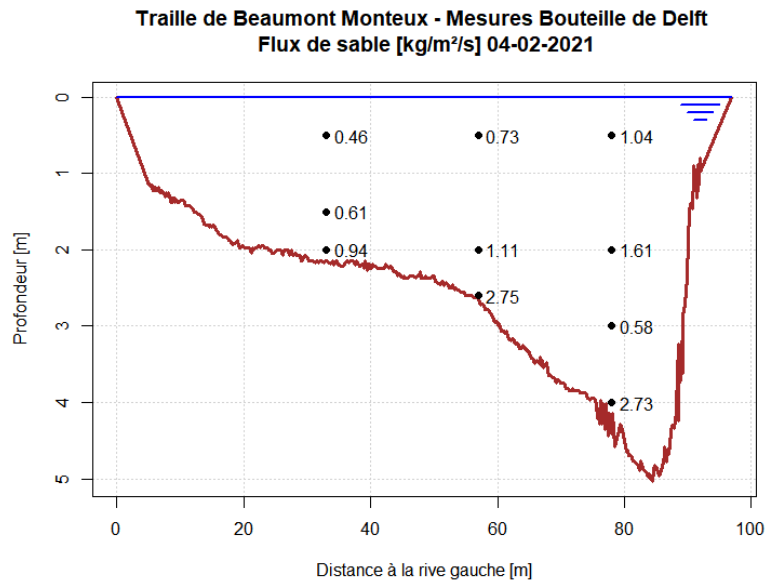


FIGURE A.14 – Flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft sur la section de la traille de Beaumont-Monteux lors de la campagne du 4 février 2021.

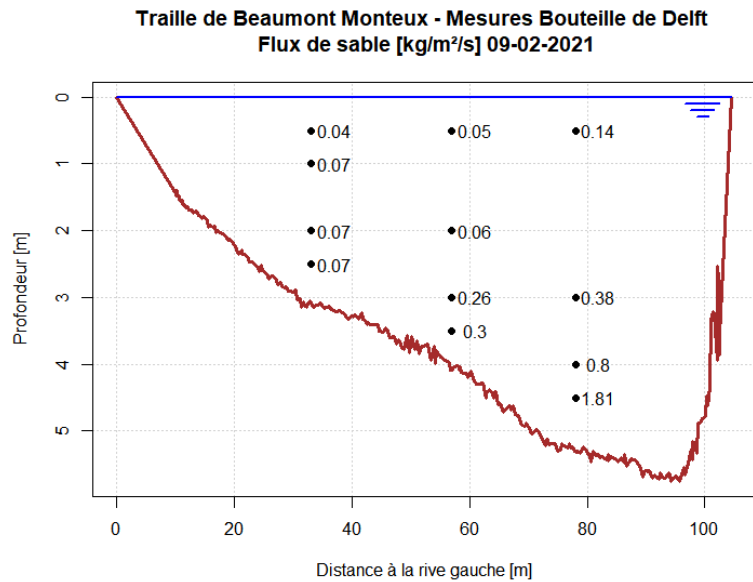


FIGURE A.15 – Flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft sur la section de la traille de Beaumont-Monteux lors de la campagne du 9 février 2021.

A.3 Représentation spatiale des mesures au pont Vélo-Route

Nous présentons ici les résultats des prélèvements de flux avec la bouteille de Delft sur la section de mesure du pont Vélo-Route.

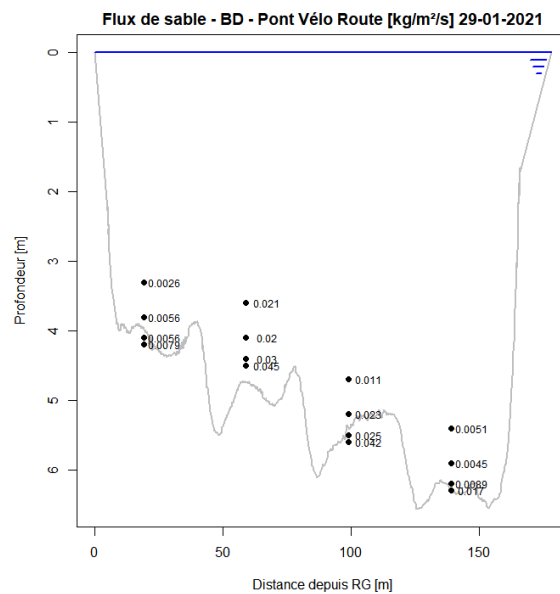


FIGURE A.16 – Flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft sur la section du pont Vélo-Route lors de la campagne du 29 janvier 2021.

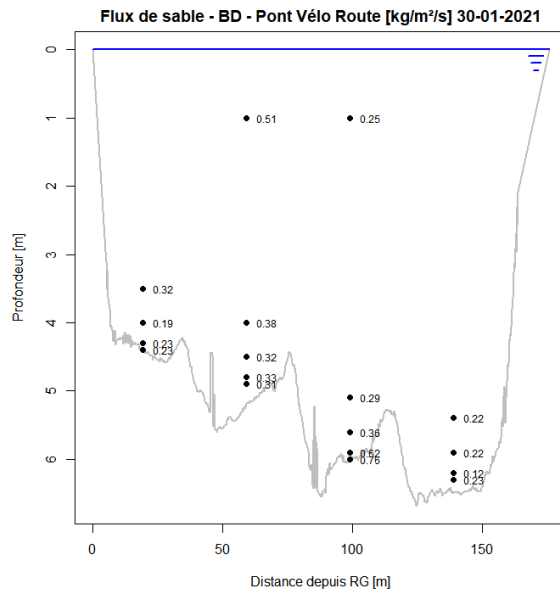


FIGURE A.17 – Flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft sur la section du pont Vélo-Route lors de la campagne du 30 janvier 2021.

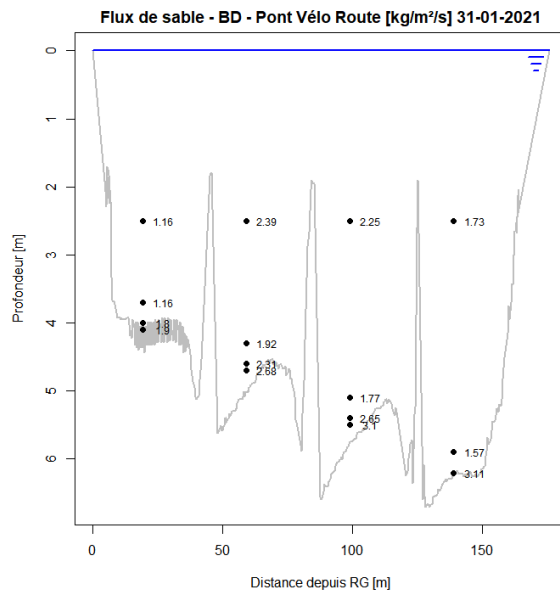


FIGURE A.18 – Flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft sur la section du pont Vélo-Route lors de la campagne du 31 janvier 2021.

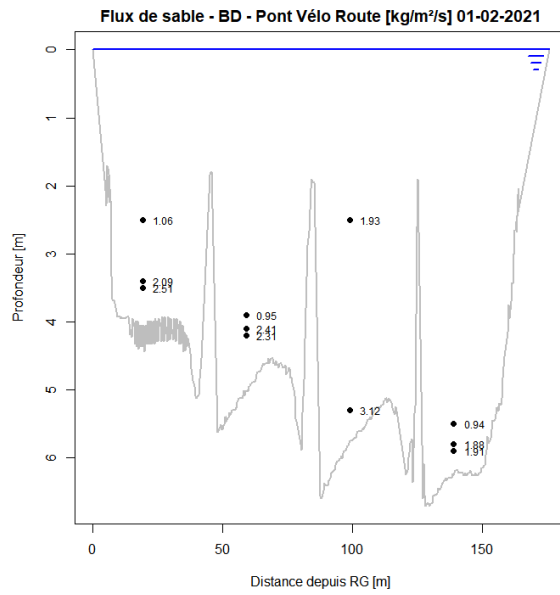


FIGURE A.19 – Flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft sur la section du pont Vélo-Route lors de la campagne du 1er février 2021.

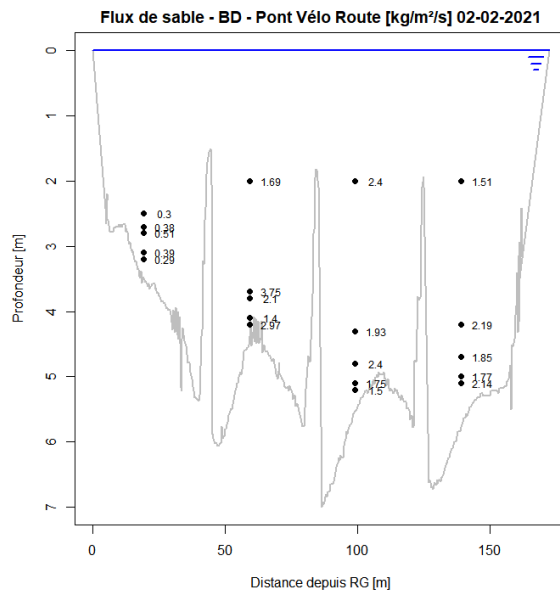


FIGURE A.20 – Flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft sur la section du pont Vélo-Route lors de la campagne du 2 février 2021.

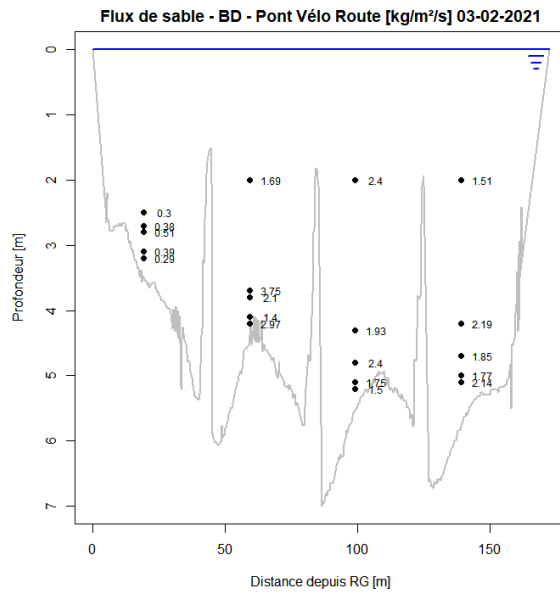


FIGURE A.21 – Flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft sur la section du pont Vélo-Route lors de la campagne du 3 février 2021.

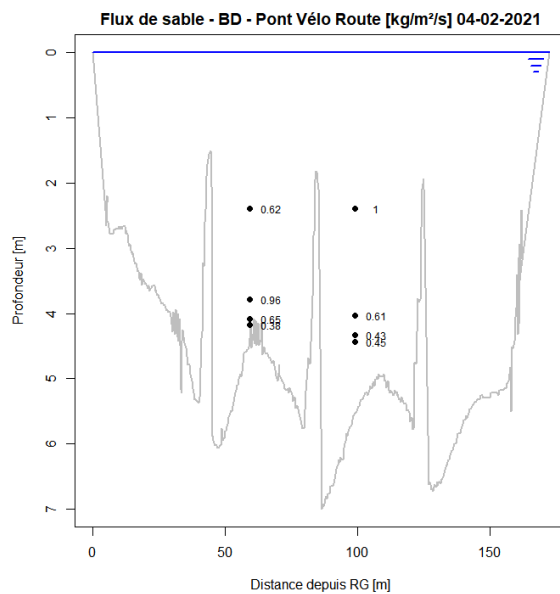


FIGURE A.22 – Flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft sur la section du pont Vélo-Route lors de la campagne du 4 février 2021.

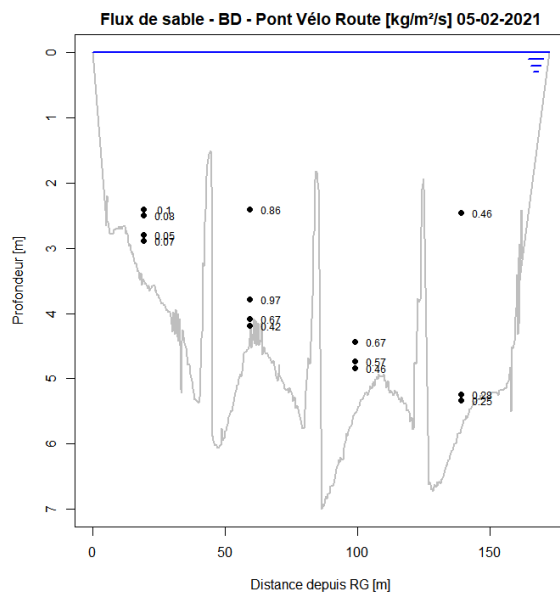


FIGURE A.23 – Flux de sable mesurés avec la bouteille de Delft sur la section du pont Vélo-Route lors de la campagne du 5 février 2021.

A.4 Graphiques avec échelle linéaire

Nous présentons ici un certain nombre de graphiques du document avec une échelle linéaire (au lieu d'une échelle logarithmique) permettant de mieux mettre en avant les valeurs élevées.

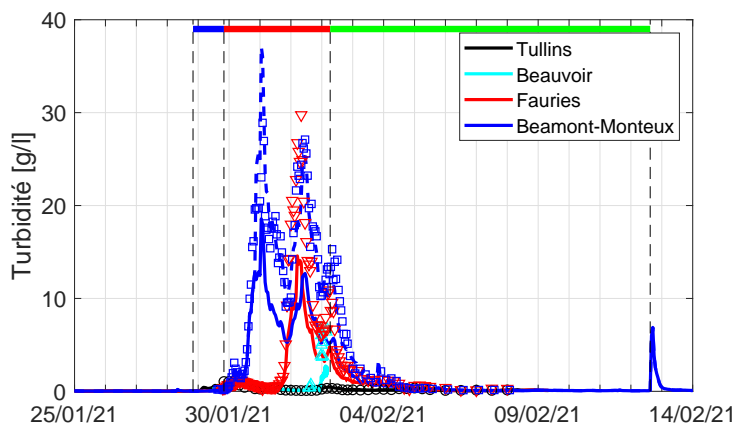


FIGURE A.24 – Turbidité mesurée sur les principales stations de la Basse-Isère (cf. Fig. 3.1).

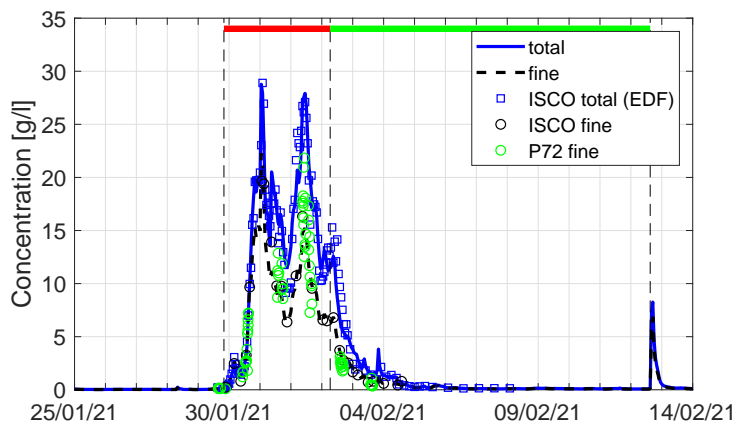


FIGURE A.25 – Concentration totale et de fines à la station de Beaumont-Monteux (cf. Fig. 3.3).

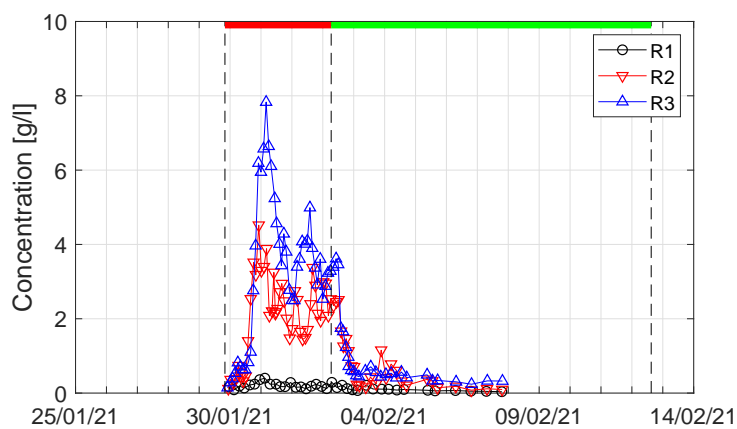


FIGURE A.26 – Concentrations mesurées sur les points de référence R1, R2 et R3 sur le Rhône (cf. Fig. 3.4).

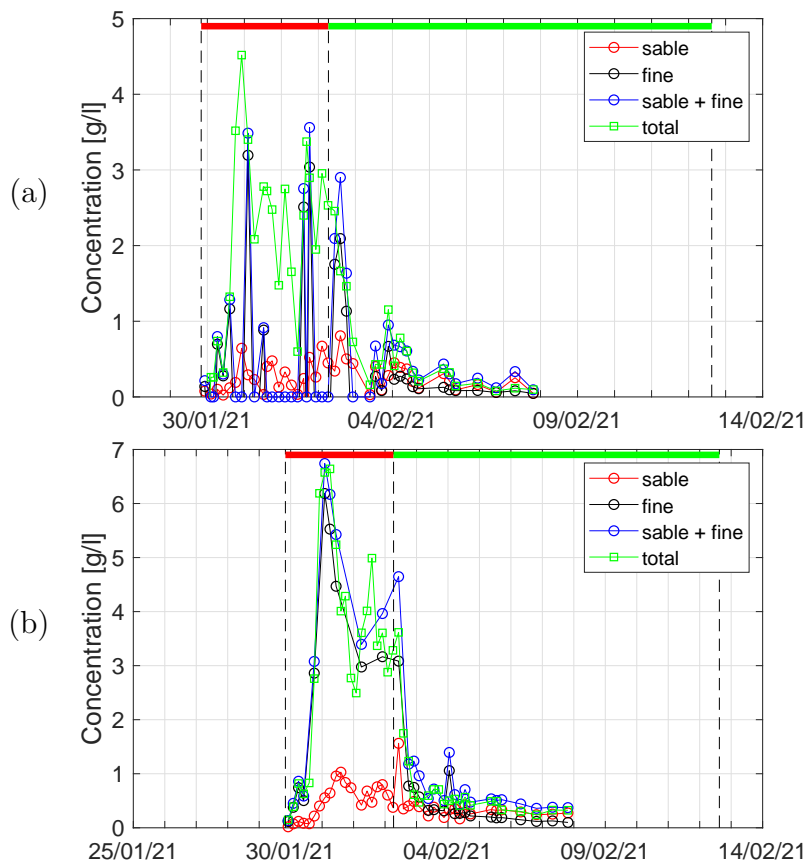


FIGURE A.27 – Concentration en sable, en fine et totale au niveau des barrages Isère (a) et de Bourg-lès-Valence (b) (cf. Fig. 3.5).

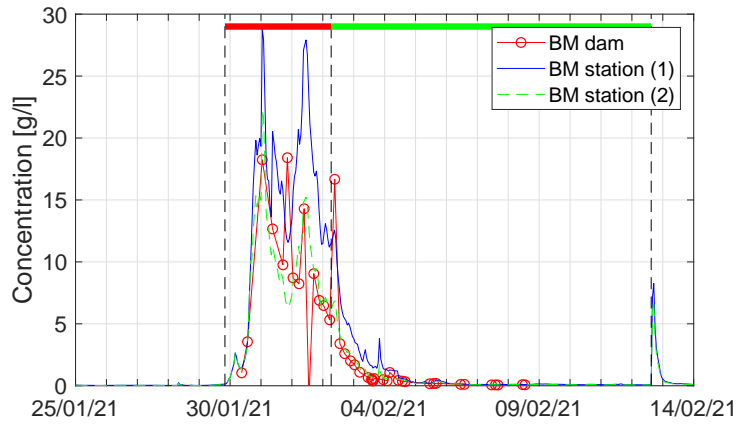


FIGURE A.28 – Concentrations en fines mesurées au niveau du barrage de Beaumont-Monteux avec un prélèvement par pompage (cf. Fig. 4.1).

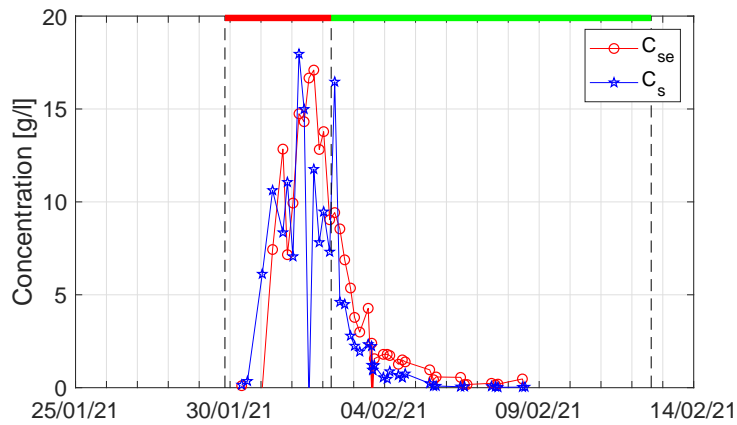


FIGURE A.29 – Concentrations en sables mesurées au niveau du barrage de Beaumont-Monteux avec un prélèvement par pompage ; comparaison entre la méthode in-situ (C_{se}) et la méthode d'analyse des échantillons (C_s) (cf. Fig. 4.2a).

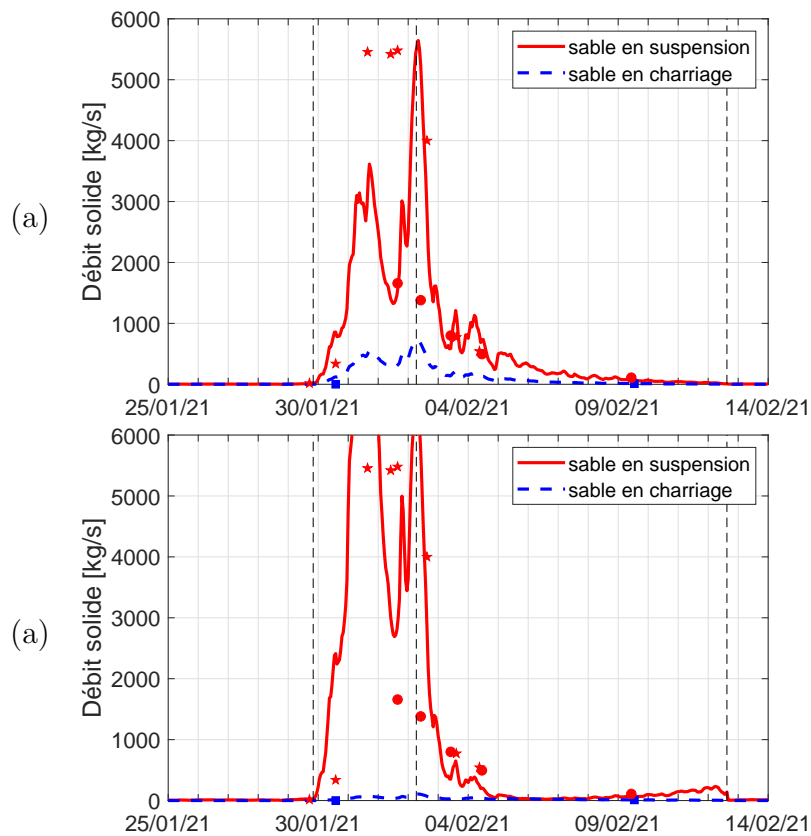


FIGURE A.30 – Chronique des débits solides par charriage et suspension calés sur les mesures de charriage et suspension au niveau de la trille de Beaumont-Monteux en supposant un diamètre médian $d_{50} = 0.22$ mm (a) ou en utilisant un diamètre variable dans le temps (b) (cf. Figs. 4.14a et 4.15a).

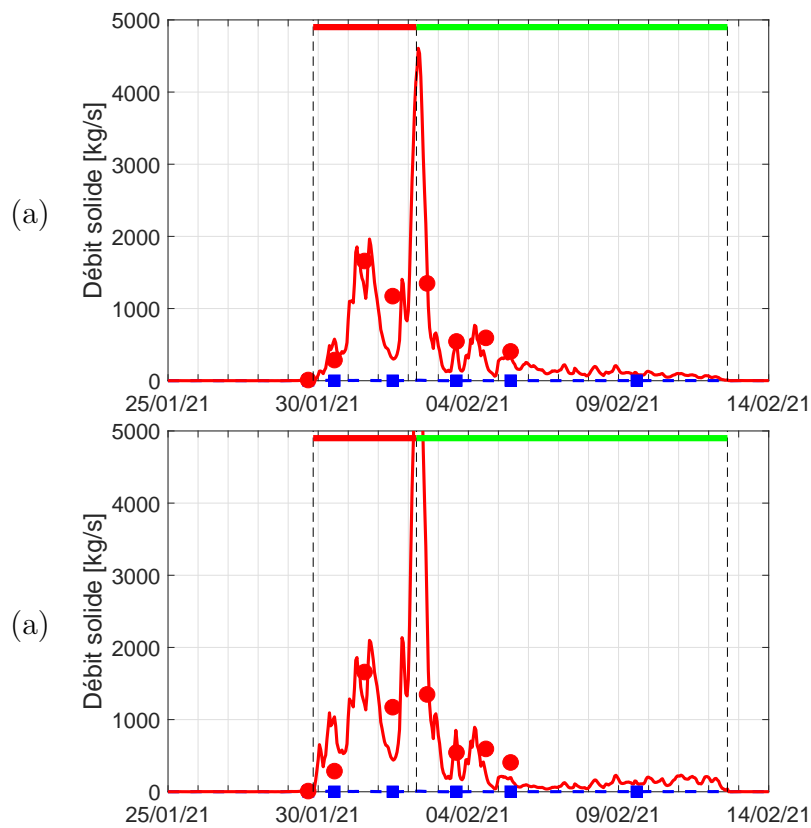


FIGURE A.31 – Chronique des débits solides par charriage et suspension calés sur les mesures de charriage et suspension au niveau du pont Vélo-Route en supposant un diamètre médian $d_{50} = 0.15$ mm (a) ou en utilisant un diamètre variable dans le temps (b) (cf. Figs. 4.17a) et 4.18a).