HAL open science

FAUT-IL TENIR COMPTE DES SABLES DANS L'ESTIMATION DES FLUX SEDIMENTAIRES EN RIVIERE PAR TURBIDIMETRIE ?

B. Camenen, Fabien Thollet, Jérôme Le Coz

To cite this version:

B. Camenen, Fabien Thollet, Jérôme Le Coz. FAUT-IL TENIR COMPTE DES SABLES DANS L'ESTIMATION DES FLUX SEDIMENTAIRES EN RIVIERE PAR TURBIDIMETRIE ?. SHF, Colloque Hydrométrie 2021, Nov 2021, Montpellier, France. hal-03559640

HAL Id: hal-03559640

https://hal.science/hal-03559640

Submitted on 7 Feb 2022

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.

FAUT-IL TENIR COMPTE DES SABLES DANS L'ESTIMATION DES FLUX SEDIMENTAIRES EN RIVIERE PAR TURBIDIMETRIE ?

Camenen Benoît[1*], Thollet Fabien[1], Le Coz, Jérôme[1]

[(1)]INRAE, Unité de recherche RiverLy, Centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes, 5 rue de la Doua - CS 20244 - 69625 Villeurbanne Cedex, France

*Auteur correspondant benoit.camenen@inrae.fr

RESUME : *Les stations hydro-sédimentaire munies d'un turbidimètre permettent une mesure en continu des Matières en Suspension (MES) dans les cours d'eau en reliant la turbidité mesurée à la concentration en MES via une courbe de calibration. La turbidité est cependant inversement proportionnelle à la taille des sédiments, impliquant une forte sensibilité de la calibration du turbidimètre aux particules les plus grossières. De plus, une hypothèse importante dans les calculs de flux sédimentaire issus d'une station hydrosédimentaire avec une mesure ponctuelle en berge est l'homogénéité des concentrations en sédiments dans la section de mesure permettant une estimation simple du flux sédimentaire, comme le produit de la concentration estimée à partir du turbidimètre et du débit liquide. Cette hypothèse devient particulièrement critiquable pour les sables qui présentent généralement un gradient de concentration vertical et latéral très marqué. L'objet de cet article est de discuter l'intérêt d'inclure les sables dans la mesure des MES par turbidimétrie pour l'estimation des flux en suspension. Sur la base d'exemples sur l'Arc-en-Maurienne et l'Isère, nous proposons d'utiliser la turbidité pour évaluer les concentrations en fines uniquement.*

MOTS-CLEFS : sable, turbidité, matière en suspension, flux

Shall we take into account sand in the estimation of sediment fluxes in rivers using turbidity?

ABSTRACT : *Hydro-sedimentary stations equipped with a turbidimeter allow continuous measurement of suspended solid matter (SSM) by linking the measured turbidity to the SSM concentrations via a calibration curve. However, turbidity is inversely proportional to the grain size, implying that the calibration of the turbidimeter is highly sensitive to the coarsest particles. Furthermore, an important assumption in sediment flux calculations from a hydrosediment station with a point measurement on side of the river is the homogeneity of sediment concentrations within the river section. Such hypothesis allows a simple calculation for the sediment flux as the product of the concentration estimated from the turbidimeter and the flow discharge. This assumption becomes particularly questionable for sands, which generally present a very marked vertical and lateral concentration gradient. The purpose of this paper is to discuss the interest of including sands in the measurement of SSM using turbidity. Based on examples from the Arc-en-Maurienne and Isère rivers, we suggest to limit the use of turbidity to assess concentrations of fine sediments only.*

KEYWORDS : sand, turbidity, suspended solid matter, flux

1 INTRODUCTION

Le suivi des flux sédimentaire en suspension dans les cours d'eau représente un enjeu de taille pour l'étude des changements morphodynamiques et leurs conséquences ainsi que pour l'étude des flux de substances associées. Aujourd'hui, le nombre de stations hydro-sédimentaires munies d'un turbidimètre s'est fortement accru à travers le monde. Même s'il existe des incertitudes sur la courbe de calibration entre la turbidité et les concentrations en MES, l'estimation des flux de MES et des bilans de flux a ainsi été très largement améliorée depuis la fin des année 1990 avec l'utilisation de

turbidimètres. En effet, ils permettent une acquisition de la donnée à haute fréquence réduisant fortement les incertitudes associées à l'intégration temporelle. Associé à un préleveur automatique pour le calage de la turbidité et à une station hydrométrique pour les débits Q, un turbidimètre rend ainsi possible l'évaluation des flux de MES Φ à haute fréquence temporelle si l'on fait l'hypothèse que la concentration C mesurée en berge est représentative de la concentration moyenne sur la section de mesure :

$$\Phi = C \times Q \tag{1}$$

Il reste toutefois très important d'évaluer les incertitudes liées à l'hypothèse d'une concentration homogène sur la section de mesure (Navratil et al., 2011). Ceci est particulièrement vrai dans le cas où une confluence est située en amont de la station mais surtout dans le cas d'une présence de sables. En effet, si les sables sont souvent transportés en suspension, ils interagissent beaucoup avec le fond et présentent un très fort gradient vertical fonction de la turbulence (Rouse, 1938) et latéral du fait de la variabilité des contraintes locales (Santini et al., 2019 ; Camenen et al., 2020). La question demeure sur la possibilité de tenir compte des sables dans la mesure de flux par turbidimétrie. Nous proposons de discuter cette problématique dans ce papier en utilisant différents exemples issus de stations hydro-sédimentaires du site-atelier Arc-Isère (Thollet et al., 2021) de la Zone Atelier du Bassin du Rhône (ZABR) et de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR). Une méthodologie pour la calibration des turbidimètres est proposée sur la base d'une description de la distribution granulométrique par un nombre limité de classes. Enfin, les limites d'une station hydro-sédimentaire pour estimer les flux de sables sont discutées par l'intermédiaire de ces exemples en se focalisant sur la calibration du turbidimètre et l'estimation des flux et incertitudes associées.

2 PRINCIPE ET CARACTERISTIQUES DE LA TURBIDITE

2.1 Courbe de tarage pour la turbidité

La turbidité T a généralement été observée comme une variable corrélée à la concentration en MES. Pour une turbidité exprimée en NTU ($T < 4000\,\mathrm{NTU} \approx 4\,\mathrm{g/L}$) ou exprimée en une unité constructeur, en g/L ($C > 4\,\mathrm{g/L}$; utilisation en rétrodiffusion), on retrouve une relation linéaire pour des concentrations inférieures à 50 g/L. Cependant, la réponse en turbidité reste sensible à d'autres paramètres comme la couleur, la composition des matériaux mais surtout le taille des particules en suspension (Pfannkuche and Schmidt, 2003; Downing, 2006 ; Thollet et al., 2013). En faisant l'hypothèse que la granulométrie des MES peut être décomposée en n classes de diamètre d_i [m] et d'une masse relative λ_i [-], la calibration d'un turbidimètre peut être réalisée en utilisant la propriété additive de la turbidité (Vongvixay, 2012 ; Armijos et al., 2017) et en faisant l'hypothèse que les particules sont de même composition, soit que la sensibilité de la turbidité à chacune des classes n'est fonction que du diamètre (Thollet et al., 2013):

$$C = a_T T = a'_T \left(\sum_{i=1}^{n} \lambda_i d_i \right) T \tag{2}$$

où a_T et a'_T sont des coefficients de sensibilité empiriques liés aux caractéristiques du matériau et du capteur ; a'_T est cependant indépendant de la taille des sédiments.

La Figure 1 présente un exemple de calage de la turbidité pour la station de Beaumont-Monteux sur l'Isère (turbidimètre Hach-Lange Solitax sc 0-50g/L). Il apparaît une forte dispersion des résultats principalement en fonction des événements mais aussi pendant un même événement. Ainsi, le coefficient a_T varie entre 0.8 lors d'événements de lave torrentielle où les sédiments sont particulièrement fins et 3.0 lors des chasses de la Basse-Isère où l'érosion des dépôts en retenue de

barrage induit une présence de particules grossières correspondant à des sables, potentiellement aussi des flocs et de nombreux débris végétaux qui peuvent fortement influencer le signal optique.

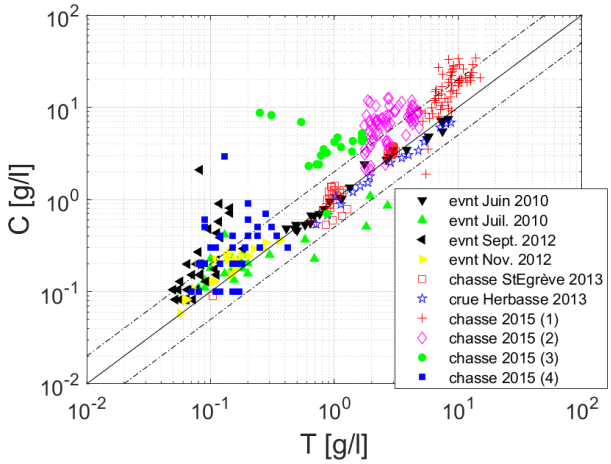

Figure 1 : Calage de la turbidité (unité constructeur en g/l) selon les événements sur la station de l'Isère à Beaumont-Monteux (d'après Camenen et al., 2020 ; les chiffres 1 à 4 pour la chasse de 2015 correspondent à différentes étapes de l'événement).

A partir de mesures granulométriques (Laser Cilas 1190), nous avons pu déterminer que les MES dans l'Isère sont composées de quatre classes principales de sédiments avec une taille centrale respective de 4, 15, 40 et 100 µm, et avec les teneurs relatives respectives pour la chasse de la Basse-Isère de 2015 lors de la première phase où les retenues des barrages ne sont pas abaissées et donc la présence de sable peu probable : 15%, 60%, 25% et proche de zéro (Naudet et al., 2016, Masson et al., 2019). En faisant l'hypothèse que seule la taille des sédiments impacte la turbidité (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), et que $a_T = 2.0$ pour cette chasse (Figure 1), il est possible de caler $a'_T = 1.0 \times 10^5$. Ainsi, nous pouvons proposer des teneurs relatives pour chacune de ces classes permettant d'expliquer la calibration du turbidimètre observée (coefficient a_T) lors d'événements particuliers (Tableau 1). Il apparaît qu'une très faible teneur relative de sable peut largement modifier la calibration de la turbidité (étapes 2 et 3 de la chasse où les vannes de fond sont ouvertes). Pour les chasses de la Basse-Isère, les débris végétaux pourraient aussi contribuer aux fortes valeurs de turbidité observées ; les résultats présentés **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**Figure 1 n'en tiennent pas compte puisqu'ils sont uniquement basées sur une mesure de masse sèche ; cela peut cependant expliquer une part de la dispersion des résultats. A l'inverse, avec ces hypothèses basées sur les mesures lors de la chasse de 2015, un coefficient de calibration $a_T < 1.5$ ne peut être expliqué que par une prédominance des argiles ($d_1 = 4$ µm) et limons fins ($d_1 = 15$ µm).

Tableau 1 : Teneurs relatives pour chacune des classes de sédiments décrivant la granulométrie des MES de l'Isère et coefficient de calibration a_T de l' ***Erreur ! Source du renvoi introuvable.*** *($a'_T = 1.0 \times 10^5$).*

Teneur relative λ_i (en %)				Coefficient de calibration a_T	Evénement
$d_1 = 4$ µm	$d_1 = 15$ µm	$d_1 = 40$ µm	$d_1 = 100$ µm		
15	60	25	0	2.00	Chasse (étape 1)
14	57	24	5	2.40	Chasse (étapes 2 et 3)
18	70	12	0	1.65	Chasse (étape 4)
20	80	0	0	1.30	Petite crue (11/12)

40	60	0	0	1.10	Petite crue (09/10)
60	40	0	0	0.85	Lave torrentielle (07/10)

2.2 Incertitudes sur une courbe de tarage pour la turbidité

Cette sensibilité de la turbidité à d'autres facteurs que la concentration explique la survenue de détarages de la relation turbidité-MES utilisée aux stations turbidimétriques, en particulier quand la station observe des apports hétérogènes liés à différentes sources sédimentaires (sous-bassins hétérogènes, érosion épisodique de dépôts en retenue ou en marges, etc.). En considérant ces détarages et l'ensemble des autres sources d'incertitude, Navratil et al. (2011) ont estimé que les flux et concentrations en MES de la station hydro-sédimentaire du Galabre à la Robine (Alpes du Sud) ont une incertitude moyenne (au niveau de probabilité de 95%) de 20 %, l'erreur pouvant varier entre 10 % et 70%. Jouzeau (2020) a trouvé pour la station hydro-sédimentaire de l'Arc au seuil de Pontamafrey que le seul détarage de la relation turbidité-MES pouvait produire, à l'échelle d'un événement hydro-sédimentaire donné, une incertitude comprise entre 20 % et 60 % selon les saisons et types d'événement. L'erreur systématique associée va se moyenner si l'on considère les flux à une échelle temporelle plus grande incluant plusieurs événements et détarages. Navratil et al. (2011) et Thollet et al. (2013) conseillent aussi de re-construire une relation turbidité-concentration en MES pour chaque évènement quand cela est possible pour minimiser l'incertitude dans le calcul des flux.

3 DISCUSSION DE L'IMPACT DES SABLES SUR LA TURBIDITE

3.1 Courbes de tarage hydro-sédimentaire

Nous proposons ici un modèle simple permettant d'évaluer les concentrations « théoriques » en sable et MES (sables exclus) afin de discuter le calage du signal de turbidité. De façon similaire à Poulier et al. (2019), il est possible d'établir une relation empirique entre les concentrations en MES (en excluant ici le sable) et le débit. Un double régime est souvent observé séparant les faibles débits d'un régime de crue :

$$C_{MES} = \begin{cases} a_1\, Q^{b_1} & Q \leq Q_{ref} \\ a_2\, (Q - Q_{cr})^{b_2} & Q > Q_{ref} \end{cases} \tag{3}$$

avec a_1, a_2, b_1 et b_2.des coefficients de calage empiriques ; $Q_{cr} = Q_{ref} - (a_1/a_2)^{1/b_2}\, Q_{ref}^{b1/b_2}$ où Q_{ref} est le débit de référence permettant de distinguer les deux régimes. Le calage a été réalisé sur les valeurs moyennes des concentrations sur des plages de débits (cercles rouge sur la Figure 2).

La Figure 2 présente les résultats pour les stations de Grenoble-Campus sur l'Isère et Pontamafrey sur l'Arc-en-Maurienne. Pour ces deux stations situées sur le même bassin versant, la qualité des sédiments peut être considérée comme identique, seules les proportions des différentes classes peuvent potentiellement différer. On peut noter une très forte dispersion des concentrations observées pour un débit donné pour le régime de base ($Q < Q_{ref}$; $b_1 \leq 1$), en particulier pour la station de Pontamafrey où les concentrations en MES peuvent varier de 10 mg/l à 100g/l.

Pour le régime de crue ($Q > Q_{ref}$), les concentrations en MES sont plus sensibles aux variations de débit dans le cas de l'Isère ($b_2 = 3$) et la dispersion autour de la relation est moins élevée. Cependant, pour la station de Pontamafrey, la relation reste peu sensible pour les très forts débits ($b_2 = 0{,}7$), correspondant potentiellement à une saturation du bassin-versant. La pente plus forte observée pour $Q \geq Q_{ref}$ tient en fait au raccord entre les deux courbes**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**.

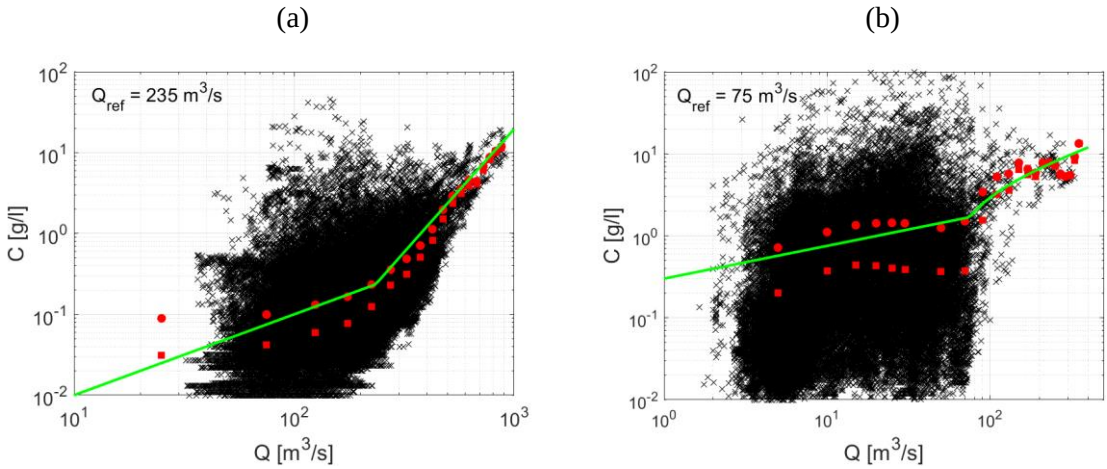

Figure 2 :Relation entre la concentration en MES et le débit de la rivière pour les stations de Grenoble-campus sur l'Isère (a) et Pontamafrey sur l'Arc-en-Maurienne (b) (les cercles et carrés rouges correspondent respectivement à une moyenne directe et à une moyenne des logarithmes des concentrations sur une plage de débits donnée).

De manière similaire, il est possible de construire une courbe de tarage sédimentaire pour le sable sur la base d'une équation de capacité de transport permettant d'évaluer le flux charrié Q_{sb} et en suspension Q_{ss} sur la section (Camenen & Larson, 2008, Camenen et al., 2020). Il est à noter que pour l'Arc, la section étudiée se situe quelques kilomètres en aval de la station de Pontamafrey. Les données expérimentales correspondent à des jaugeages de transport solide sur une ou plusieurs verticales avec une bouteille de Delft (BD), une préleveur USGS de type P72 et/ou une pompe péristaltique (Camenen et al., 2020). La calibration de la courbe de tarage se fait ici par l'intermédiaire d'un coefficient multiplicatif $\mu \leq 1$ correspondant à la teneur relative (disponibilité) en sable au fond (Figure 3) en faisant l'hypothèse d'une seule classe de sédiment de diamètre égal au diamètre médian d_{50}. Que ce soit pour l'Isère ou pour l'Arc-en-Maurienne, la disponibilité en sable μ semble varier significativement selon les débits. Cela peut s'expliquer par une potentielle reprise des dépôts de sable sur les bancs à partir du moment où ces derniers sont submergés. Pour l'Arc-en-Maurienne, on peut aussi noter que les barrages au fil de l'eau sont ouverts pour les principaux événements où les mesures ont été réalisées (chasses, crues d'intensité supérieure à la crue annuelle) ; les quelques points mesurés hors chasse ($Q \approx 50\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$) sont bien en dessous la courbe de tarage. Un calage a ainsi été proposé en prenant une valeur de $\mu = \mu_{max}$ pour les forts débits et une valeur 10 fois plus faible pour les faibles débits (Figure 3).

Sur l'Arc-en-Maurienne, nous obtenons un μ_{max} dix fois supérieur à celui de l'Isère à Grenoble indiquant une présence beaucoup plus élevée de sables. Les incertitudes pour ces courbes de tarage restent très élevées du fait du peu de points expérimentaux ; l'objectif reste ici de prédire une valeur de la concentration en sable réaliste en fonction du débit. Enfin, même s'il n'a pas été mesuré, il apparaît que le charriage peut potentiellement être du même ordre de grandeur que la suspension sur l'Arc-en-Maurienne contrairement à l'Isère du fait des profondeurs plus faibles et pentes plus fortes sur l'Arc-en-Maurienne.

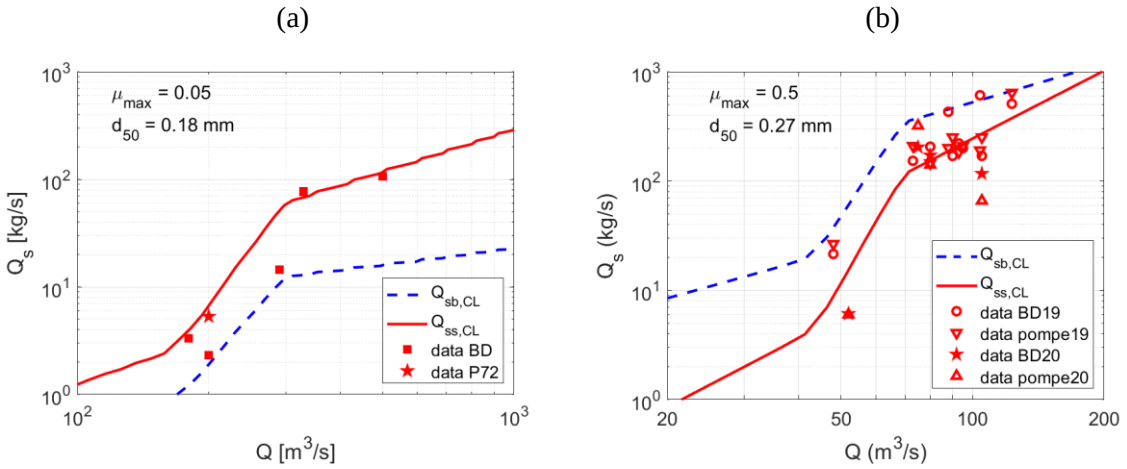

Figure 3 :Courbe de tarage hydro-sédimentaire de la fraction sableuse en fonction du débit de la rivière pour les stations de Grenoble-campus sur l'Isère (a) et Pontamafrey sur l'Arc-en-Maurienne (b) (Q_{sb} : capacité de transport par charriage ; Q_{ss} : capacité de transport par suspension; indice CL pour Camenen & Larson).

3.2 Impact des sables sur la turbidité sur la base des courbes de tarage hydro-sédimentaires

Cette différence de caractéristique de la suspension sableuse dans l'Isère et l'Arc-en-Maurienne se retrouve accentuée dans les concentrations moyennes sur la section ($C_s = Q_{ss}/A_w$ avec A_w la section mouillée). La Figure 4 présente les concentrations « théoriques » en sable, en MES (sables exclus) issues des courbes de tarage hydro-sédimentaires présentées précédemment en fonction du débit. Les MES totales sont alors obtenues en sommant les deux concentrations, soit $C_{tot} = C_{MES} + C_s$. On peut ainsi voir Figure 4 que les concentrations en sable restent très faibles sur l'Isère à Grenoble même en période de crue ($C_s < 0{,}3$ g/l) alors qu'elles peuvent être très élevées sur l'Arc-en-Maurienne ($C_s >$ 2 g/l si $Q > 100$ m^3/s). Pour les forts débits, les concentrations en sable sur l'Arc-en-Maurienne seraient du même ordre de grandeur que les concentrations en fines (MES) alors qu'elles sont le plus souvent négligeables sur l'Isère (Camenen et al, 2020).

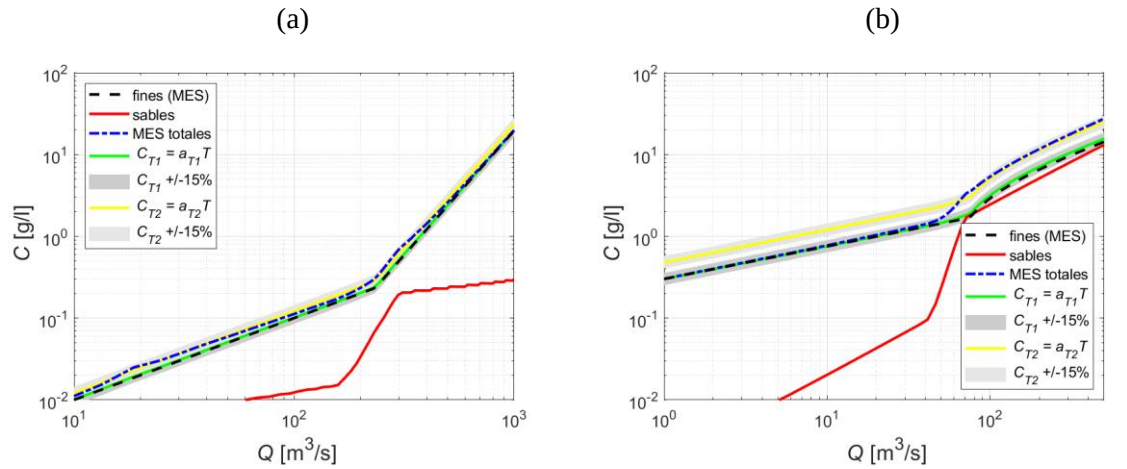

Figure 4 :Concentrations moyennes sur la section en sable, en MES et turbidité en fonction du débit de la rivière pour les stations de Grenoble-campus sur l'Isère (a) et Pontamafrey sur l'Arc-en-Maurienne (b).

En faisant l'hypothèse que le diamètre des sables est 10 fois supérieur au diamètre moyen des fines, il est possible d'évaluer ce que verrait un turbidimètre sur la base de l'équation (2) connaissant les concentrations en fines et en sable soit :

$$T = \alpha \left(C_{MES} + \frac{C_s}{10} \right) \tag{4}$$

avec α pris ici égal à 1 par simplification. Une autre forte hypothèse faite ici est que le turbidimètre posé en berge voit une concentration en sable à peu près égale à la concentration moyenne en sable.

Nous avons ajouté sur la Figure 4 la concentration calée sur ce signal turbidité en focalisant le calage sur les concentrations en fines (MES, courbe verte $C_{T1} = a_{T1}T$ avec $a_{T1} = 1$). Il apparait clairement que le sable dont la concentration est généralement inférieure à celle des fines n'impacte que très peu le signal de turbidimétrie. La courbe des fines (MES) reste ainsi le plus souvent dans la barre d'erreur de 15% de l'évaluation de la concentration C_{T1}. De manière similaire, nous avons ajouté une courbe correspondant à la concentration calée sur ce signal turbidité en focalisant le calage sur les MES totales (incluant les sables, courbe jaune $C_{T2} = a_{T2}T$ avec $a_{T1} = 1.2$ pour l'Isère à Grenoble-Campus et 1.6 pour l'Arc à Pontamafrey). Il apparaît qu'une telle courbe peut être très difficile à caler. Dans le cas de la station de Pontamafrey sur l'Arc-en-Maurienne, un calage sur les fortes concentrations implique une forte surestimation pour les faibles concentrations. Pour l'Isère à Grenoble, du fait des faibles concentrations en sable, le calage est meilleur mais reste plus incertain que celui pour les fines seules.

Ce modèle simple montre donc que, même en connaissant les caractéristiques granulométriques de la suspension, les incertitudes liées à un calage unique de la turbidité sur l'ensemble de la gamme de débit induit une incertitude pouvant aller jusqu'à 50% si l'on cherche à inclure les sables alors qu'elle reste inférieure à 15% si on exclut les sables. Aussi, ceci suggère potentiellement de créer une double courbe de tarage afin d'inclure les sables lorsqu'ils sont non-négligeables.

3.3 Une courbe de tarage de la turbidité fonction du débit ?

La Figure 5 présente les données expérimentales pour le calage de la turbidité sur la station de l'Isère à Pont-de-Grésy. Même s'il existe une forte dispersion des points expérimentaux, on peut observer une nette sensibilité du coefficient de calage a_T avec le débit de l'Isère. Un calage unique donne $a_T = 1.2$ alors que ce dernier semble varier de $a_T \approx 1{,}0$ pour les faibles débits à $a_T \approx 1{,}8$ pour les forts débits. Ceci correspondrait donc à une adaptation de la courbe de tarage selon les débits, soit indirectement à une adaptation de la courbe de tarage selon la teneur relative en sable dans les MES vues par le turbidimètre.

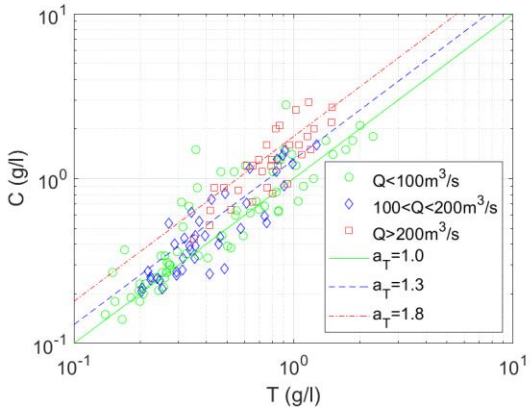

Figure 5 : Calage de la turbidité (unité constructeur en g/l) selon le débit sur la station de l'Isère à Pont-de-Grésy.

En prenant $a_T = 1.2$, nous obtenons un flux de MES sur le premier semestre 2020 de $4{,}6 \times 10^8$ kg. En prenant a_T variant linéairement avec le débit de 1 pour $Q = 100\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$ à 1.8 pour $Q = 200\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$ et égal à 1.8 au-delà, nous obtenons un flux de MES sur le premier semestre 2020 de $6{,}8 \times 10^8$ kg. Si l'on fait l'hypothèse que sans les sables, le coefficient $a_T = 1.0$, nous obtenons donc un flux de fines de $3{,}8 \times 10^8$ kg et donc un flux de sable de $3{,}0 \times 10^8$ kg. Ce résultat reste cependant très approximatif et correspond indirectement à établir une courbe de tarage $Q_s = f(Q)$ pour le sable comme discuté précédemment. De plus, cela implique que pour un débit donné, nous faisons l'hypothèse d'une teneur relative en sable constante ; ce qui est clairement non vérifié (cf. Figure 2).

3.4 Impact de la granulométrie

Il apparaît très important de réaliser des granulométries des échantillons analysés afin de pouvoir discuter les potentielles variabilités du calage de la turbidité pour une courbe de tarage. Cependant, la qualité de l'échantillon peut aussi être discutée. Même si le prélèvement avec un préleveur automatique est fait au même niveau que le turbidimètre, il existe un doute sur la qualité de l'échantillonnage pour les sédiments sableux (Camenen et al., 2021) et sur la représentativité de cet échantillon par rapport à la concentration moyenne en sable sur la section de mesure. Si aujourd'hui, le développement de la granulométrie laser a permis d'améliorer la qualité de ces mesures, il reste une problématique importante liée à l'échantillonnage : (1) un biais non-négligeable peut être observé pour les particules les plus grossières lié au sous-échantillonnage (Dramais et al., 2018) et la difficulté de maintenir une suspension homogène dans le cas des sables ; (2) une question demeure sur la représentativité des échantillons analysés a posteriori dans un environnement différent de celui de la rivière. Ceci est particulièrement problématique dans le cas où le phénomène de floculation n'est pas-négligeable mais aussi dans le cas d'une présence de débris (feuilles, etc.). Ce que voit le turbidimètre peut ainsi être très différent de ce que l'on peut voir sur une analyse a posteriori d'un échantillon nettoyé de sa composante organique. Les appareils comme le LISST200X (Sequoia Scientific) peuvent permettre une analyse granulométrique in situ mais restent limités à de faibles concentrations (1 à 2 g/l).

Une fois la granulométrie des échantillons connue, nous proposons de réaliser une analyse des modes principaux (Masson et al., 2018) et ainsi de vérifier la stabilité ou non des principaux modes et de leur teneur relative en fonction du débit. Cette première étape devrait permettre un meilleur calage de la turbidité à l'aide de l'Equation 2, voire éventuellement de proposer des lois semi-empiriques pour les teneurs relatives pour chacune des classes comme présenté dans le Tableau 1. Nos premiers résultats indiquent toutefois qu'il n'y a pas de stabilité du mode sableux en fonction du débit (cf. Figure 4 et Figure 5). De plus, une telle méthode est applicable et robuste tant que l'hypothèse d'une

concentration homogène sur la section de mesure est vérifiée (Navratil et al., 2011), ce qui peut facilement exclure les sables comme discuté précédemment.

4 CONCLUSION

Les incertitudes sur les mesures de concentration par turbidimétrie sont principalement liées aux possibles variations granulométriques de la suspension et à la potentielle non-homogénéité de la concentration sur la section de mesure alors que la mesure se fait en berge. Il semble donc très important de faire des analyses granulométriques de la suspension afin d'améliorer la courbe de tarage et réduire les incertitudes de mesures. Nous avons montré que du fait de la faible sensibilité de la turbidité aux sables, la prise en compte de ces derniers pour le calage du turbidimètre induit de fortes incertitudes. De plus, la teneur relative en sable par rapport aux autres classes formant les MES peut largement varier avec le débit et donc compliquer un tel calage. L'exploitation d'une courbe de tarage de la turbidité variable avec le débit peut permettre de distinguer les flux de fines des flux de sables mais cela reste une évaluation très grossière. En ce sens, nous suggérons d'exclure les sables dans la mesure et analyse de la turbidité et d'évaluer les flux sableux à l'aide d'une courbe de tarage hydro-sédimentaire à base physique calée avec des jaugeages de transport solide.

5 REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier EDF-DTG pour la mise à disposition des données de la station de Beaumont-Monteux. Ce travail a été réalisé au sein du projet DEAR grâce au soutien de l'Agence Nationale de la Recherche ANR (ANR-18-CE01-0019-01), et dans le cadre de l'Observatoire des Sédiments du Rhône et du site atelier Arc-Isère de la ZABR (Zone Atelier du Bassin du Rhône).

6 REFERENCES

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: 654–667.

Camenen, B. & Larson, M. (2008). A general formula for non-cohesive suspended sediment transport. Journal of Coastal Research, 24: 615-627.

Camenen, B. & Melun, G. (2021). Guide technique pour la mesure et la modélisation du transport solide. Edition OFB (Office National de la Biodiversité), Collection Guides et protocoles. 146 p.

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 of the Total Environment, 657 : 485-497.

Camenen, B.; Thollet, F.; de Angelis, R.; Buffet, A.; Dramais, G.; Valette, E. & Zanker, S. (2020). An estimation of the sand suspension in alpine rivers during a dam flushing event. River Flow, Proc. 9th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, Uijttewaal, W.; Franca, M. J.; Valero, D.; Chavarrias, V.; Ylla Arbós, C.; Schielen, R. & Crosato, A. (Eds.), 8 p.

Camenen, B.; Deville-Cavellin, L. ; Thollet, F.;.Bonnefoy, A., Fretaud, T. & Pierrefeu, G. (2021). Evaluation d'une pompe péristaltique pour l'échantillonnage d'une suspension sableuse. Proc. Colloque SHF Hydrométrie 2021 - "De la mesure à la prise de décision", Montpellier, Nov. 2021.

Downing, J. (2006). Twenty-five years with OBS sensors: the good, the bad, and the ugly. Continental Shelf Res. 26, 2299–2318.

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. La Houille Blanche, 5-6 : 96-105.

Jouzeau, P. (2020). Quantification des incertitudes sur les flux particulaires dues aux courbes de tarage turbidité – MES. Rapport stage M1, Inrae-Univ. Nice/Sophia-Antipolis. 28 p.

Masson, M., Angot, H., Le Bescond, C., Launay, M., Dabrin, A., Miège, C., Le Coz, J. & Coquery, M. (2018). Sampling of suspended particulate matter using particle traps in the Rhône River: relevance and representativeness for the monitoring of contaminants. Science of the Total Environment 637-638: 538-549.

Navratil, O., Esteves, M., Legout, C., Gratiot, N., Némery, J., Willmore, S. & Grangeon, T. (2011). Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. Journal of Hydrology. 398: 246–259.

Pfannkuche, J. & Schmidt, A. (2003). Determination of suspended particulate matter concentration from turbidity measurements: particle size effects and calibration procedures. Hydrological Processes. 1: 1951–1963.

Poulier, G.; Launay, M.; Le Bescond, C.; Thollet, F.; Coquery, M. & Le Coz, J. (2019). Combining flux monitoring and estimation to establish annual budgets of suspended particulate matter and associated pollutants in the Rhône River from Lake Geneva to the Mediterranean Sea. Science of the Total Environment, 658 : 457-473.

Rouse, H. (1938). Experiments on the mechanics of sediment suspension. 5th Int. Cong. Appl. Mech. Proc., Wiley & Sons, 55 : 550-554.

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 : 654-667

Thollet, F.; Le Coz, J.; Antoine, G.; François, P.; Saguintaah, L.; Launay, M. & Camenen, B. (2013). Influence de la granulométrie des particules sur la mesure par turbidimétrie des flux de matières en suspension dans les cours d'eau. La Houille Blanche, 4:50-56.

Thollet, F.; Rousseau, C.; Camenen, B.; Boubkraoui, S.; Branger, F.; Lauters, F. & Némery, J. (2021). Long term high frequency sediment observatory in an alpine catchment (Arc-Isère Rivers, French Alps). Hydrological Processes, 35(e14044): 1-6

Vongvixay, A. (2012). Mesure et analyse de la dynamique temporelle des flux solides dans les petits bassins versants: Cas d'un bassin versant agricole en région d'élevage (Le Moulinet, Basse-Normandie, France). Thèse de doctorat, INSA Rennes.