



HAL
open science

Influence de la granulométrie des particules sur la mesure par turbidimétrie des flux de matières en suspension dans les cours d'eau

F. Thollet, J. Le Coz, G. Antoine, P. François, L. Saguintaah, M. Launay, B. Camenen

► To cite this version:

F. Thollet, J. Le Coz, G. Antoine, P. François, L. Saguintaah, et al.. 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 - Revue internationale de l'eau, 2013, 4, p. 50 - p. 56. 10.1051/lhb/2013033 . hal-00934481

HAL Id: hal-00934481

<https://hal.science/hal-00934481v1>

Submitted on 22 Jan 2014

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.

Influence de la granulométrie des particules sur la mesure par turbidimétrie des flux de matières en suspension dans les cours d'eau

F. THOLLET¹, J. LE COZ¹, G. ANTOINE², P. FRANÇOIS³, L. SAGUINTAAH¹, M. LAUNAY¹, B. CAMENEN¹

¹ Irstea, UR HHLY, Hydrologie-Hydraulique, 5 rue de la Doua 69100 Villeurbanne – fabien.thollet@irstea.fr

² EDF, LNHE, Bat. Q, 6 quai Watier, 76401 Chatou Cedex - germain.antoine@edf.fr

³ IMFS, 2 rue Boussingault 67000 Strasbourg - pierre.francois@unistra.fr

RÉSUMÉ. – Irstea mesure depuis 2009 les flux de sédiments en suspension sur le bassin versant de l'Arc en Maurienne, très producteur en sédiments, au moyen de quatre stations turbidimétriques chacune associées à une station débitmétrique. La mesure en continu de la turbidité est convertie en concentration en Matières En Suspension (MES) dans le cours d'eau par le biais d'analyses d'échantillons et par l'établissement de courbes d'étalonnage $[MES] = f(\text{turbidité})$; de même que les hauteurs d'eau sont converties en débit par courbes de tarage $Q = f(h)$ établies par le biais de jaugeages. Il apparaît cependant pour notre site d'étude qu'une relation moyenne n'est pas applicable à l'ensemble des événements hydrologiques. En effet, pour une même concentration, la sensibilité du capteur de turbidité varie d'un événement à l'autre. L'erreur commise sur les flux événementiels peut ainsi atteindre 30 % typiquement et ponctuellement dépasser 80 % par rapport à un flux calculé avec une relation moyenne, tandis que l'erreur sur le flux annuel moyen reste acceptable (inférieure à 15 % typiquement).

Une des hypothèses régulièrement avancées pour expliquer ces changements de relations $[MES] = f(\text{turbidité})$ est la variation de la granulométrie des sédiments. Ce document présente un retour d'expérience sur la mise en évidence de la variation de sensibilité de la sonde turbidimétrique en fonction de la fraction granulométrique étudiée. Celle-ci est trouvée proportionnelle à l'inverse du diamètre médian de la fraction étudiée.

La stratégie de gestion des courbes d'étalonnage turbidimétrique revêt donc autant d'importance que celles des courbes de tarage pour l'estimation de flux dont l'incertitude usuelle est moindre surtout à l'échelle événementielle.

Mots-clés : MES, turbidimétrie, sédiment, mesure.

Influence of grain size changes on the turbidity measurement of suspended solid fluxes in watercourses

ABSTRACT. – Since 2009, Irstea has been measuring suspended sediment fluxes on the Arc river in the French Alps, a great sediment contributor, by using turbidity monitoring systems at four stations; each of them is associated with a discharge measurement system. High frequency turbidity measurement is converted into Suspended Sediment Concentration (SSC) through a $SSC = f(\text{turbidity})$ relation, thanks to sample analysis. Nevertheless a mean relation is not relevant for all flood events for our study site since turbidity sensors do not give the same response for a given SSC. Therefore with the event-scale relation, the uncertainty on the sediment flux can typically reach 30% and sometimes exceed 80% compared with the mean relation while the uncertainty on annual flux remains acceptable (less than 15%)

A hypothesis to explain this variable relation is the variation of the SSC grain size in the river. This paper presents the results obtained with an experiment showing the variations of sensitivity of the turbidity sensor to suspensions with different grain size. It is found to be correlated inversely proportional to the median diameter of the particles.

Strategy for managing turbidity calibrations is thus as important as rating curves for hydrometric stations for estimating suspended sediment fluxes. The uncertainty on rating curves is lower especially for the event scale.

Key-words: SSC, turbidity, sediment, measurement

I. INTRODUCTION

Dans le prolongement naturel des suivis hydrométriques, le suivi du transport sédimentaire en suspension représente un enjeu de taille pour l'étude des changements morphodynamiques et leurs conséquences sur les inondations, les flux de substances adsorbées sur les sédiments, l'habitat écologique ainsi que pour la gestion d'ouvrages hydro-électriques par le colmatage des retenues ou l'abrasion des équipements par les matériaux transportés.

La quantification des masses de sédiments transportés est nécessaire pour mieux comprendre ces transferts et passe par le calcul de flux de Matières En Suspension (MES). Outre les débits, il convient donc de mesurer en continu les concentrations en MES car elles varient sur plusieurs ordres de grandeur au cours du temps. Cette mesure s'effectue généralement par l'enregistrement de chroniques de turbidité dans un cours d'eau; la conversion en concentration massique de MES se fait alors par application d'une loi de conversion construite grâce à des analyses ponctuelles de

MES par filtrations - pesées. Toutefois, la granulométrie des particules en suspension est souvent évoquée comme facteur déterminant dans la stabilité de la relation de conversion turbidité / MES [Gippel, 1989] ou [Némery *et al.* 2010].

Ce document présente des expérimentations en laboratoire mettant en évidence l'importance de la granulométrie sur la réponse du capteur de turbidité. Dans une seconde partie, sont également présentées les erreurs commises sur le flux de sédiments en suspension pour plusieurs séries d'évènements sur l'Arc à Pontamafrey selon le type de relation utilisée.

II. SITE D'ÉTUDE

Le site d'étude se trouve dans les Alpes françaises dans la vallée de la Maurienne. L'Arc est un cours d'eau fortement aménagé pour l'hydroélectricité : retenues d'altitudes, conduites forcées, barrages de fond de vallée, prises d'eau et dérivations vers les usines, etc. Il transporte très activement de grandes quantités de sédiments fins, en particulier des marnes noires très érodables, en provenance de sous-bassins versants en rive gauche (Valloirette, Arvan, Glandon). Il fait partie du site atelier Arc/Isère, dont les objectifs sont d'estimer les possibles évolutions de l'Arc et de l'Isère, l'état des aménagements hydroélectriques et de mieux comprendre la dynamique des MES.

Les concentrations en MES observées varient de quelques milligrammes par litre à plusieurs dizaines de grammes par litre lors d'épisodes pluvieux intenses ou de chasses de barrages. Pour assurer un suivi précis du transport sédimentaire, Irstea utilise des turbidimètres capables de suivre ces évolutions saisonnières mais aussi journalières en période de fonte des neiges [Mano *et al.* 2007]. Ainsi plusieurs stations de mesures sédimentaires ont été implantées depuis 2009 (Figure 1). Elles s'appuient sur les stations débitométriques exploitées par EDF, le SPC Alpes du Nord et la Dreal Rhône-Alpes pour le calcul de flux.

Ce document traite des mesures en continu acquises sur la station de mesure de Pontamafrey sur l'Arc moyen. Elle est équipée d'un transmetteur Hach Lange SC100 relié à une sonde néphélométrique Solitax de gamme 0-150 g/l

fonctionnant en mode rétrodiffusion à 140°. L'enregistrement sur une centrale d'acquisition à raison d'une donnée toutes les cinq minutes permet de reproduire fidèlement les variations du paramètre. La construction de la courbe de conversion est réalisée par des échantillonnages manuels en surface pour analyse des MES mais aussi grâce à l'utilisation d'un préleveur automatique ISCO 3700 asservi au turbidimètre (déclenchement sur franchissement de consigne) et exploitant les évènements de crue au pas de temps d'une heure [Thollet, 2012]. Un limnimètre (EDF) mesure les variations de hauteur d'eau en amont d'un seuil bétonné et les données sont converties en débits au moyen d'une courbe de tarage.

Le flux de MES sur une période donnée est calculé à partir des chroniques de concentration et de débit exprimées au même pas de temps (Eq. 1):

$$\Phi(P) = \int_P C_s Q dt \approx \sum_P C_{si} Q_i \Delta t_i \quad (\text{Eq. 1})$$

où Φ indique le flux de sédiments, P la période, C_s la concentration et Q le débit. En pratique, l'intégrale (2ème membre) est discrétisée sur les pas de temps de mesure Δt_i (3ème membre).

Le débit à la station de Pontamafrey est calculé à partir d'une mesure en continu de hauteur d'eau associée à une courbe de tarage. La source d'erreur principale sur le débit réside généralement dans la construction de cette dernière [McMillan *et al.* 2012], notamment pour la gamme non jaugée où l'incertitude est généralement plus forte. Le logiciel BaRatin¹ [Le Coz *et al.* 2013] nous permet d'estimer l'incertitude sur la courbe de tarage et donc sur le débit. La courbe de tarage calculée par le logiciel (Figure 2) prend en compte la géométrie des trois seuils horizontaux qui assurent le contrôle hydraulique et des jaugeages acquis avec différentes méthodes et leurs incertitudes associées² :

- exploration du champ des vitesses : 7 %
- ADCP : 10 % (car réalisés en conditions dégradées)

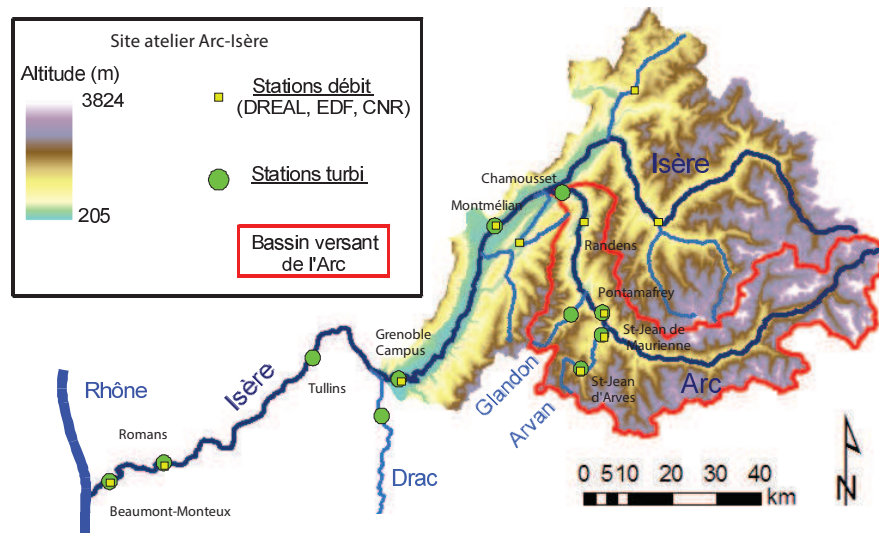


Figure 1 : Positionnement des stations de mesure sur le site Arc – Isère.

1. BaRatin © Irstea, Renard Benjamin, Bonnifait Laurent, Le Coz Jérôme, Branger Flora et Dmitri Kaveski, téléchargé le 15/11/2012

2. Exprimées ici comme le demi-intervalle au niveau de confiance de 95 %.

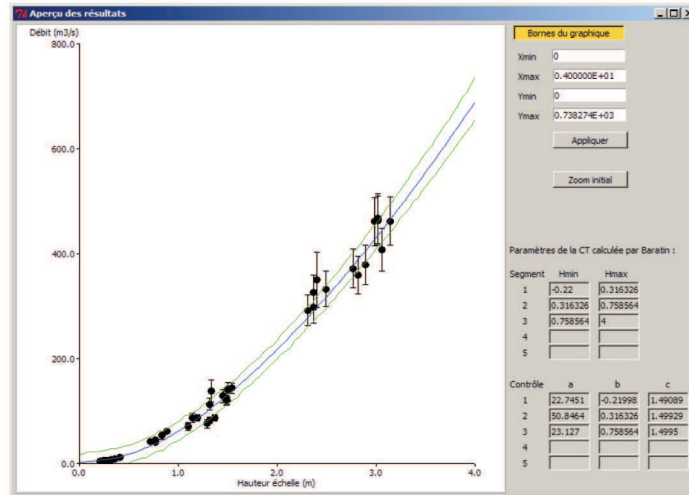


Figure 2 : Courbe de tarage de la station de Pontamafrey obtenue avec le logiciel BaRatin.

— par analyse de séquences d'images (LSPIV) : de 10 à 15 %

La stabilité de la section et la bonne répartition des jauges dans la gamme de débit permettent d'élaborer une courbe de tarage solide avec un fuseau d'incertitude inférieure à 10 % dans la majeure partie de la gamme. Sur les bas débits, typiquement inférieurs à 10 m³/s, elle peut atteindre plus de 15 % mais dans le contexte de l'estimation de l'erreur commise sur le flux de MES, cela ne représente pas une contribution importante puisqu'on ne rencontre les fortes concentrations qu'à haut débit.

La courbe de tarage est construite pour une gamme de débit et pour une période donnée mais pour une station à contrôle stable comme Pontamafrey, elle n'évolue pas à chaque événement hydrologique.

En revanche, plusieurs relations linéaires liant concentration en MES et turbidité (Eq.2) ont pu être construites pour la station de Pontamafrey sur la période d'avril 2011 à juin 2012, et sept événements ont été isolés parmi les événements hydrologiques observés (Figure 3). Il s'agit d'événements ayant bénéficié d'un échantillonnage régulier sur la plus grande partie de la crue ou en régime de base (octobre 2011). Parallèlement, l'ensemble des analyses réalisées a

également servi à l'établissement d'une relation moyenne globale pour la station de mesure. La réponse du capteur de turbidité peut varier significativement pour deux événements successifs et l'utilisation de la relation moyenne englobant l'ensemble des événements explorés ne paraît donc pas appropriée. Une des hypothèses régulièrement avancées pour expliquer ces changements de relation est la variation de la nature des sédiments : couleur, forme et surtout granulométrie [Gippel, 1989].

$$C_s = aT \quad (\text{Eq. 2})$$

où C_s indique la concentration (en g/l), a le coefficient directeur de la relation (sans dimension) et T la turbidité (unité constructeur ou UC). D'un point de vue métrologique, le coefficient a correspond à l'inverse de la sensibilité du capteur où la concentration en MES est le forçage et la turbidité le signal de sortie.

L'erreur produite sur le flux peut par conséquent être non négligeable si on choisit d'utiliser une relation moyenne et non la relation liée à l'événement. Toutefois, ceci n'est pas le cas sur la station Campus à Grenoble sur l'Isère en aval

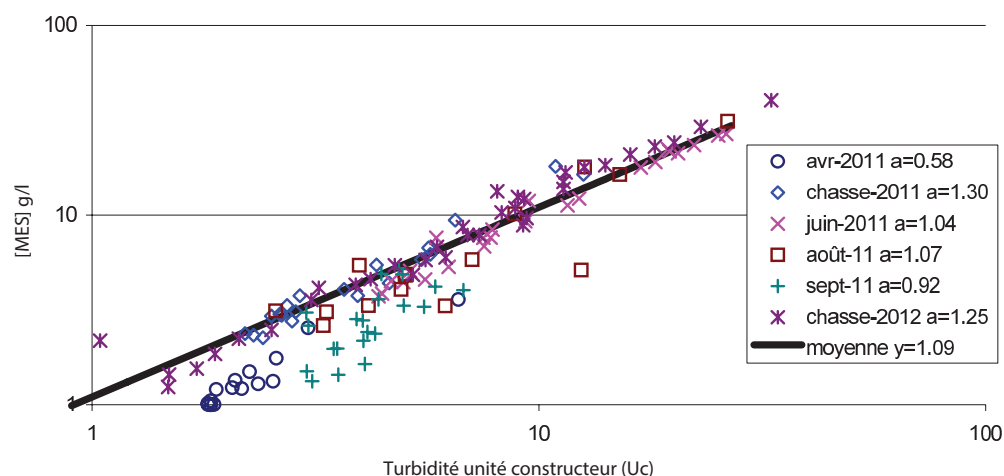


Figure 3 : Courbes de calibration événementielles sur l'Arc à Pontamafrey.

du bassin Arc - Isère où les particules transitant au droit de la station de mesure sont de qualité constante sauf pour des cas très particuliers comme des laves torrentielles ou lors d'une crue décennale en 2008 [Némery *et al.* 2010].

III. INFLUENCE DE LA GRANULOMETRIE SUR LA TURBIDITE

L'objectif est de vérifier et de caractériser l'influence de la granulométrie sur la sensibilité de la sonde turbidité. Bien que des expériences similaires aient déjà été réalisées notamment par [Foster *et al.* 1992] et [Vongvixay 2012], il nous est apparu important de maîtriser les conditions expérimentales en utilisant du sédiment collecté sur l'Arc, un turbidimètre identique à ceux utilisés sur le site atelier Arc - Isère et surtout un système de mise en suspension du sédiment assurant une bonne homogénéité du mélange.

III.1. Protocole expérimental

Du sédiment fin a été collecté sur une plage de dépôt sur l'Arc (Figure 4a) puis tamisé en voie humide (Figure 4b) pour constituer six fractions granulométriques. Chacune a été traitée individuellement. Elles ont été introduites dans une colonne de décantation cylindrique à l'Institut de Mécanique des Fluides des Solides (IMFS). Elle garantit un mélange homogène de la suspension via une pompe de recirculation et quatre buses d'injection régulièrement réparties en fond de colonne (Figure 4c). Une sonde Hach Lange Solitax 0-150 g/l reliée à un système d'acquisition a été placée dans la colonne de manière à enregistrer des paliers de turbidité générés par ajouts successifs d'aliquotes de fractions granulométriques. L'utilisation de défloculant (hexamétophosphate de sodium) assure la non agglomération des particules. Après un temps de contact suffisant pour assurer le bon mélange de la suspension (la turbidité ne varie plus) chaque palier est échantillonné pour analyse de la concentration en MES par filtration - pesée selon la norme NF EN ISO 872 (06-2005) et de la distribution granulométrique à l'aide d'un granulomètre laser Cilas 1190 pour vérifier l'absence de variation au cours de l'expérience et pour caractériser les fractions selon leur distribution surfacique. On suppose en effet que la sonde turbidité est sensible à la surface des particules et l'intensité du rayon réfléchi est directement proportionnelle

à la somme des sections des particules situées dans le champ de rayonnement [Vongvixay, 2012]. Pour caractériser la taille des particules, notamment le diamètre médian, on utilise donc ici les distributions en surface plutôt qu'en volume comme fait plus habituellement. Le diamètre médian surfacique est inférieur au diamètre médian volumique.

III.2. Résultats

Les couples turbidité / MES obtenus au cours de l'expérience permettent d'établir des relations linéaires pour chaque fraction granulométrique. La représentation sur un même graphique de ces relations met en évidence l'influence de la taille des particules sur la réponse du capteur de turbidité (Figure 5a). Ainsi, plus le diamètre médian de la suspension est faible, plus la réponse du capteur turbidité est importante.

La sonde turbidité est plus sensible aux particules fines car ces dernières, pour une concentration massique équivalente (en g/l ou kg/m³), offrent une surface de réflexion (en m²) plus grande que des particules grossières ; l'intensité du rayonnement infra-rouge réfléchi étant proportionnel à la somme des sections des particules dans le champ du rayonnement. Il est alors plus utile de raisonner en concentrations surfaciques (en m²/m³). Sous simple hypothèse que les particules soient sphériques, les équations 3, 4 et 5 démontrent que la concentration surfacique dépend à la fois de la concentration massique des particules et de leur diamètre.

$$C_{mass} = \frac{\rho_s \times N \times V_{sphère}}{V} = \frac{\rho_s \times N \times \pi \times d^3}{6 \times V} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$C_{surf} = \frac{N \times S_{sphère}}{V} = \frac{N \times \pi \times d^2}{4 \times V} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$C_{surf} = \frac{3 \times C_{mass}}{2 \times d \times \rho_s} \quad (\text{Eq. 5})$$

où C_{mass} indique la concentration massique, $\rho_s \approx 2650$ kg/m³ la masse volumique du sédiment, N le nombre de particules, d le diamètre, V le volume de contrôle et C_{surf} la concentration surfacique.

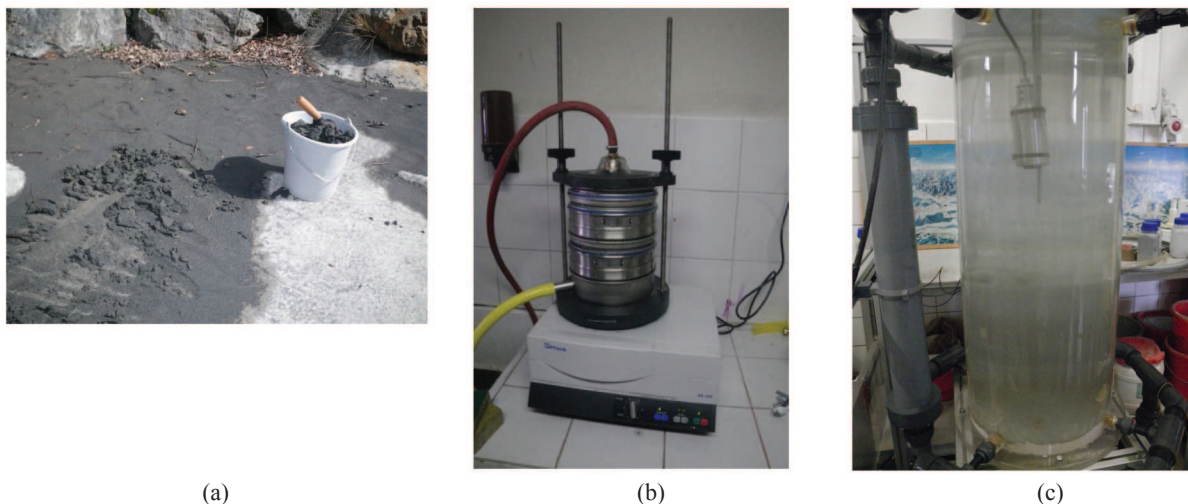


Figure 4 : Collecte de sédiments (a), tamisage en laboratoire (b), mise en suspension (c).

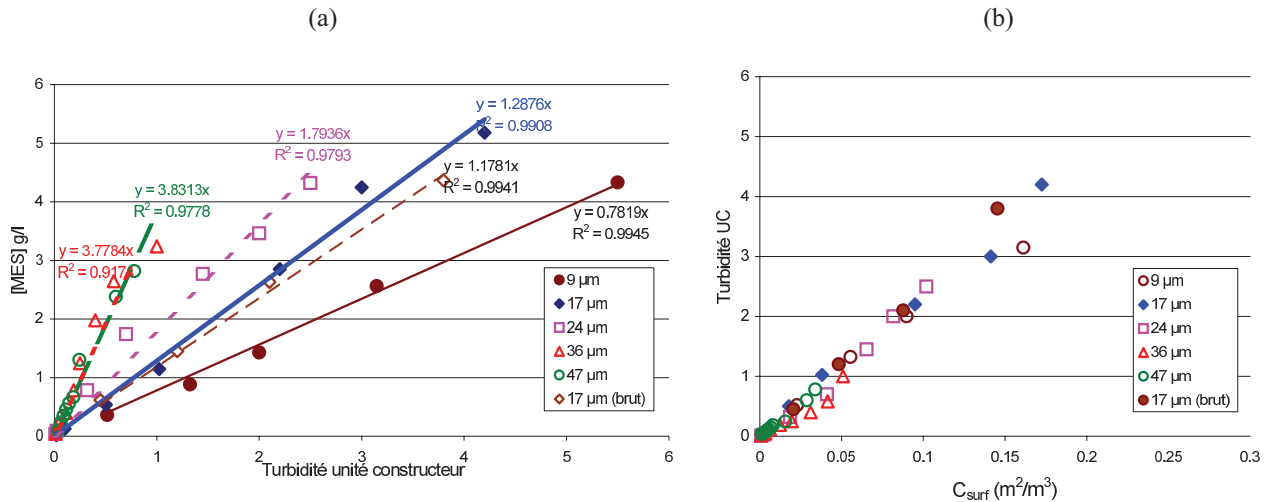


Figure 5 : Courbes Turbidité = f (MES) pour les différentes fractions granulométriques étudiées (a) Relations entre turbidité et concentrations surfaciques (b).

On vérifie expérimentalement que la dépendance au diamètre de la pente d'étalonnage de la relation qui lie turbidité et concentration surfacique est constante quelle que soit la fraction étudiée (Figure 5b).

Nos expériences ont permis de porter notre attention sur le sédiment brut (zone de dépôt) et cinq fractions granulométriques issues de tamisages. La figure 6a montre que la sensibilité du capteur ($1/a$ dans l'équation 2 au §2) varie linéairement avec l'inverse du diamètre médian des particules en distribution surfacique. La relation est néanmoins propre à la sonde turbidimétrique utilisée du fait de propriétés optiques et de réglages en usine uniques. Cette relation nous offre la possibilité de calculer le diamètre médian surfacique lorsque la sensibilité du capteur est connue ($1/a$) comme pour les sept événements étudiés sur la station de Pontamafrey (voir §IV) pour lesquels une relation MES / turbidité a été construite (Tableau 1). On constate par exemple qu'il est sensiblement plus important pour des événements de chasse de barrage, 15 μm, qui correspondent à l'évacuation des sédiments décantés dans les retenues (donc plus grossiers)

Il convient alors de bien distinguer ces diamètres médians calculés par rapport à des valeurs mesurées en laboratoire (diamètres médians surfaciques dans les deux cas). Le D_{50} mesuré au cours de la *chasse 2012* est de 18 μm pour une valeur calculée de 15 μm. L'ordre de grandeur est respecté

et la cohérence entre les deux valeurs plutôt bonne sachant que la distribution granulométrique varie au cours de l'événement. La bonne connaissance de la sonde turbidimétrique utilisée est donc un moyen d'identifier par rétro-calcul le type de sédiments transportés dans un cours d'eau.

Un turbidimètre mesure donc des concentrations de surface de particules, et non de volume ou de masse, d'où les détarages observés sur l'étalonnage en concentration massique, qui s'avère inversement proportionnel au diamètre. C'est pourquoi pour la qualification des tailles de particule, on utilisera des diamètres médians surfaciques issus des mesures par granulométrie laser.

Les relations turbidité / C_{surf} (Figure 5a) ont toutes une même pente³ $a' \approx 22$ UC/(m²/m³), ce qui confirme qu'elles ne dépendent pas du diamètre des particules (Figure 6b).

Néanmoins, la fraction granulométrique dont le diamètre médian surfacique vaut 36 μm s'écarte légèrement des autres points. Un incident de manipulation en est peut-être la cause ou le manque de valeurs de turbidité supérieures à 1 contrairement aux autres fractions (figure 4a).

Pour revenir au cas des mesures en continu sur l'Arc la distribution granulométrique des particules varie en fonction des événements hydrologiques en lien avec la provenance

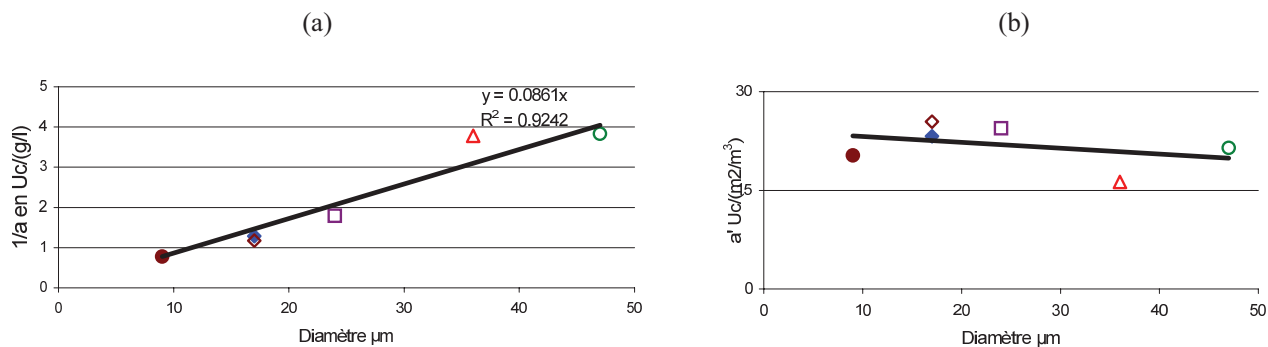


Figure 6 : Relation entre l'inverse de la sensibilité de la sonde turbidimétrique et le diamètre médian (a). Relation entre turbidité et concentration surfacique (b).

3. UC Unité Constructeur

des sédiments. Il convient donc de tenir compte de l'impact de ces variations sur la relation massique turbidité / MES permettant le calcul de flux de MES. Ces stations de mesure sont relativement proches des zones de production sédimentaire, contrairement à Grenoble-Campus par exemple, pour laquelle le tri granulométrique lié à la propagation du flux est déjà bien effectué.

IV. CALCUL DE FLUX EVENEMENTIELS

Ce chapitre traite des sept événements isolés sur la station de Pontamafrey (Figure 2). Les flux de sédiments en suspension obtenus en utilisant la relation moyenne et la relation événementielle ont ainsi pu être comparés (Tableau 1).

Le flux total de sédiments en suspension sur l'ensemble de la période atteint 988 000 tonnes en appliquant la relation moyenne lorsqu'aucune relation événementielle n'est disponible. Les sept événements étudiés, soit 7 % de la durée totale, représentent 16,5 % du flux total sur la période. Sur les événements étudiés, le flux total ne semble que très légèrement impacté (écart 2 %). L'analyse d'un plus grand nombre d'événements sur plusieurs stations sédimentaires indique que l'écart relatif peut atteindre 15 % en moyenne inter-événementielle [Saguintaah, 2012]. Ceci dépend évidemment de la représentativité des événements échantillonnés et la caractérisation d'un maximum d'événements pour un cours d'eau torrentiel est la clé pour minimiser l'erreur sur le flux annuel.

Les écarts entre les deux méthodes peuvent être significatifs: typiquement de -17 % à +88 %. La qualité granulométrique du sédiment transporté par chacun des événements implique ainsi la nécessité d'une calibration dédiée. En particulier les événements identifiés *chasse 2011* et *chasse 2012* correspondent à des chasses de barrage opérées par l'exploitant d'ouvrages hydroélectriques pour redonner de la capacité aux retenues engravées. On peut donc s'attendre à trouver des sédiments de nature différente au cours de telles opérations où les concentrations atteignent 30 à 40 g/l au pic de concentration, ce que l'on ne retrouve que très occasionnellement lors de crues naturelles. Par ailleurs, pour ces deux événements l'écart par rapport à la relation moyenne est équivalent. Il conviendrait de vérifier sur les prochaines chasses hydrauliques si une analogie existe réellement et si elle pourrait être utilisée pour calculer l'erreur par rapport au flux de la relation moyenne. Dans les cas de ces deux

chasses, où le diamètre des particules en suspension est plus important qu'en régime de base, l'utilisation de la relation moyenne conduit à sous-estimer le flux de sédiments en suspension ce qui confirme la sensibilité de la sonde turbidimétrique aux particules les plus fines démontrée au §III.

L'analyse des données de l'événement marqué *Avril 2011* pour lequel l'écart entre les deux méthodes de calcul de flux est le plus marqué (+88 %) ne montre pas de problème métrologique ou analytique qui justifierait de ne pas le retenir. Bien qu'il s'agisse d'un événement hydrologique mineur en termes de flux, l'erreur commise atteint en proportion une valeur très significative. Le début de la période de fonte des neiges et le dégel explique peut-être cet écart par le départ brutal de sédiments dont la nature diffère de ceux transitant habituellement dans l'Arc. On retrouve à la même période un écart tout aussi significatif sur l'Arvan, affluent de l'Arc [Saguintaah 2012]. Il semble donc que la seule contribution d'un affluent puisse impacter de manière importante le calcul de flux sur l'Arc par modification de la relation turbidité / MES.

V. CONCLUSIONS

Comme nous l'avons montré avec l'expérience en laboratoire, la taille des particules exerce une influence indiscutable sur la relation turbidité / MES et les capteurs néphélogométriques possèdent une sensibilité inversement proportionnelle à la taille des particules exprimée en D_{50} de la distribution surfacique : la sensibilité du capteur est plus grande pour les particules fines. Une stratégie pour le calcul de flux pourrait être de ne plus constituer des échantillons sur la totalité d'un événement mais de disposer de quelques analyses de MES complétées d'analyses granulométriques ce qui permettrait de choisir la meilleure relation à appliquer. Inversement, pour une relation turbidité / MES établie à partir d'un nombre d'échantillon important, il devient possible de déterminer le diamètre médian surfacique des sédiments transités.

Pour améliorer le calcul de flux sédimentaires en suspension pour une rivière torrentielle de montagne, donc à proximité des zones de production avec un tri par propagation très peu développé, il convient d'adapter la stratégie de gestion des courbes d'étalonnage turbidité / MES. L'erreur commise en utilisant une relation moyenne peut être importante à l'échelle de l'événement, de -17 à +88 %, mais a

Tableau 1 : Comparaison des flux événementiels et moyens.

Evènements	Pente (a) (Eq. 2)	R ²	Diamètre calculé §III-2 (µm)	Période		Flux relation événementielle (tonnes)	Flux relation moyenne (tonnes)	Ecart %
				Début	Fin			
<i>avril 2011</i>	0.58	0.92	6.7	08/04/2011 0h	09/04/2011 24h	1 762	3 312	88
<i>chasse 2011</i>	1.30	0.94	15.1	07/06/2011 0h	07/06/2011 24h	20 218	16 952	-16
<i>juin 2011</i>	1.04	0.99	12.1	16/06/2011 0h	18/06/2011 24h	33 629	35 245	5
<i>août 2011</i>	1.07	0.87	12.4	07/08/2011 0h	07/08/2011 24h	21 606	22 099	2
<i>sept. 2011</i>	0.92	0.96	10.7	27/08/2011 0h	05/09/2011 24h	18 267	21 641	18
<i>octobre 2011</i>	0.85	0.94	9.9	25/10/2011 0h	04/11/2011 24h	10 964	14 060	28
<i>Chasse 2012</i>	1.25	0.98	15	05/06/2012 0h	05/06/2012 24h	56 737	46 900	-17
Totaux						163 183	160 209	-2

toutefois moins d'impact à l'échelle annuelle. La période pour laquelle on calcule le flux avec une relation moyenne est donc un des critères à prendre en compte pour apprécier l'erreur commise et pour le cas d'une période courte il convient idéalement de disposer d'analyses de concentrations pour le calage.

Ces premiers résultats pourraient être étoffés en isolant des types d'événements hydrologiques (crue d'orage en provenance d'un sous-bassin, chasse hydraulique, lave torrentielle, fonte) et en cherchant s'il existe une relation événementielle type qui permettrait par analogie d'apprécier un écart systématique par rapport à la relation moyenne.

Pour le calcul de flux, si on isole les fonctions de calibration de chacune des mesures - débit et concentration - l'incertitude à l'échelle annuelle ou pour plusieurs événements cumulés sur la courbe de tarage pèse aussi lourd sur le calcul de flux que celle liée à la conversion turbidité / MES (environ 10 %) ce qui n'est plus vrai à l'échelle de l'évènement hydrologique, où l'incertitude liée à l'étalonnage turbidimétrique devient prépondérante.

De plus, la sensibilité du capteur turbidimétrique n'est pas l'unique source d'erreur sur la mesure ponctuelle de concentration en MES. Parmi elles, l'hétérogénéité des concentrations dans la section et la position du point de prélèvement font l'hypothèse d'une concentration homogène dans la colonne d'eau alors qu'on peut supposer qu'il existe un gradient longitudinal et vertical des concentrations. L'exploration de l'ensemble de la section comme elle est pratiquée en jaugeage par exploration du champ des vitesses permettrait de mieux estimer cette incertitude. Enfin, le prélèvement des MES, manuel ou automatique, n'est pas exempt d'erreurs systématiques et aléatoires, de même que le sous-échantillonnage et l'analyse au laboratoire.

VI. REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du site atelier Arc-Isère de la ZABR. Les auteurs remercient François Lauters et Luc Micolet, EDF, pour le prêt du transmetteur Hach Lange pour l'expérience réalisée à Strasbourg. Merci également à Marie Courtel, Mickaël Lagouy et Guillaume Dramais d'Irstea Lyon pour leur participation aux missions de terrain sur l'Arc, à la préparation du matériel expérimental ou à la réalisation d'analyses MES et granulométriques. Enfin, merci à Flora Branger, Irstea Lyon, pour les programmes de traitement de données et de calcul de flux.

VII. REFERENCES

- FOSTER I.D.L., MILLIGTON R. ET GREW R.G. (1992) — The impact of particle size controls on stream turbidity measurement; some implications for suspended sediment yield estimation. *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins. Proceedings of the Oslo Symposium. IAHS. 210*
- GIPPEL C.J. (1989) — The use of turbidimeters in suspended sediment research. *Hydrobiologia. 176/177* : 465-480
- LE COZ J. (2013) — Analyse bayésienne des courbes de tarage et de leurs incertitudes. La méthode BaRatin. *Congrès SHF Hydrométrie 2013, Paris, 15-16 mai 2013.*
- MCMILLAN H., KRUEGER T. ET FREER J. (2012) — Benchmarking observational uncertainty for hydrology: rainfall, river discharge and water quality. *Hydrological Processes. 26* : 4078-4111
- VONGVIXAY A. (2012) — Mesure et analyse de la dynamique temporelle des flux solides dans les petits bassins versants. *Thèse de doctorat, Université Européenne de Bretagne.*