

Retour d'expérience sur l'utilisation de la turbidité en rivière de montagne

Feedback on the use of turbidity in mountainous rivers

Némery, J¹, V. Mano¹, O. Navratil¹, N. Gratiot¹, C. Duvert¹, C. Legout¹, P. Belleudy¹, A. Poirel² et M. Esteves¹

¹ *LTHE (UMR 5564, CNRS, UJF, INPG, IRD), BP 53, 38 041 GRENOBLE Cedex 09*

² *EDF-DTG GRENOBLE*

Résumé

Les sondes turbidimétriques sont de plus en plus utilisées par la communauté scientifique et les gestionnaires pour le suivi du transport des sédiments en rivière de montagne. Plusieurs bassins versants de montagne dans les Alpes françaises et dans les hautes terres volcaniques du Mexique ont été instrumentés de turbidimètres pour le suivi en continu des concentrations en Matière En Suspension (MES). Dans ce type de bassin, les concentrations en MES atteignent des valeurs extrêmes de plusieurs dizaines à centaines de grammes par litre. Deux capteurs hautes concentrations ont été testés et sont utilisés en routine pour le suivi des MES. Ce papier présente un retour d'expérience sur l'instrumentation in situ et sur la construction des courbes de calibration MES/turbidité. Il est également montré l'utilité de cette mesure pour le calcul des flux de MES et de pollution particulaire en rivière.

Mots clé : turbidité, sédiment, rivières de montagne

Abstract

Turbidimeters are used by the scientific community and the rivers managers for the survey of sediment transport in mountainous watersheds. Many mountainous watersheds in the French Alps and in the volcanic highlands of Mexico were equipped with turbidimeters for the continuous survey of the Suspended Sediments Concentrations (SSC). In such watersheds, SSC concentrations reach extreme values (ten to hundred grams per litre). Two sensors of high range concentrations were tested and are used routinely. This paper deals with the feedback on the in situ instrumentation and on the building of SSC/turbidity calibration curve. It also shows the utility of this type of measurement for the calculation of sediments fluxes and particulate pollution fluxes in rivers

Keywords : turbidity, sediments, mountainous rivers

Introduction

L'enjeu de la gestion des sédiments en rivière de montagne est fort à la fois par leurs effets sur la géomorphologie, sur les risques et les usages. Les sédiments grossiers influencent fortement la géomorphologie du cours d'eau mais les Matières en Suspension (MES) contribuent à fixer et à exhausser les lits en permettant leur végétalisation. Les MES, qui représentent la majorité du transport solide, affectent également la capacité de stockage des retenues hydroélectriques, d'eau potable ou d'irrigation en accélérant leur comblement (Maneux et al, 2001). A l'échelle mondiale il est estimé que les barrages retiennent jusqu'à 30 % du flux terrestre de sédiments qui arrivent aux océans (Vörösmarty et al, 2003 ; Syvistski et al, 2005). Les gestionnaires sont alors obligés d'effectuer des chasses d'entretien des ouvrages

ou encore des dragages très coûteux. Ces actions affectent généralement l'écosystème « rivière » en aval. Les gestionnaires sont actuellement dans une recherche d'anticipation des événements de fort transport solide pour rendre « transparents » les ouvrages et ainsi éviter le stockage des sédiments. N'oublions pas que les MES sont aussi des vecteurs privilégiés pour le transport des polluants particuliers tels les métaux (Coynel et al, 2007) ou les éléments nutritifs et organiques (Némery & Garnier, 2007). Pour déterminer au mieux ces flux particuliers en rivière, une bonne estimation des flux de MES s'avère nécessaire. Face à ces problématiques importantes de la gestion des sédiments fins dans les rivières de montagne, le suivi en continu des concentrations en MES en continu est indispensable et la turbidimétrie s'impose en terme d'instrumentation. Les bassins versants de montagne sont soumis à des événements pluviométriques de forte intensité. Les événements peuvent être très localisés et courts dans le temps. Ce qui rend le transport de sédiment extrêmement épisodique. A ceci s'ajoute le processus de fusion nivale (cas des Alpes) qui s'exprime au printemps sous la forme d'un cycle journalier du transport de MES. Les concentrations en MES rencontrées dans ces bassins versants atteignent des records (jusqu'à plusieurs centaines de grammes par litre dans certains cas, Mathys et al, 2003). La taille du bassin versant est aussi un élément clé en terme de durée et d'intensité des événements (Meybeck et al, 2003). Plus le bassin est petit en surface, plus les événements sont courts et concentrés et donc difficiles à mesurer. Cependant quelques-uns de ces événements peuvent parfois transporter plus de 50 % du flux annuel de MES (Mano et al, 2009). Par ailleurs un échantillonnage discret peut apporter un biais important quant à l'estimation des flux de MES (Moatar et al, 2006). D'où la nécessité de mettre en œuvre une instrumentation capable d'assurer une continuité de l'acquisition des concentrations en MES, indispensable à toute quantification exhaustive des flux de sédiment dans ce type de bassins versants.

Au sein de la communauté française, l'intérêt pour cette problématique de l'estimation des flux de MES redevient importante après les grandes études fondatrices de 1870-1890 par les agronomes (Mangon, 1869), puis de 1910-1920 par les concepteurs des premiers barrages (Muntz et Lainé, 1913) et enfin des années 1950 par les gestionnaires et concepteurs des grands barrages modernes. En témoignent les journées thématiques « Transports solides et gestion des sédiments en milieux naturels et urbains » organisées par la SHF à Lyon en décembre 2007. A bien des égards, la problématique des bassins versants de montagne est très proche de celle des bassins versants urbains. L'objectif est d'estimer au mieux la quantité de MES qui transite au cours d'un événement hydrologique très épisodique. Dans le cadre de la publication des journées thématiques « turbidimétrie en réseaux d'assainissement » de SHF-ASTEE, nous nous efforcerons de présenter dans ce papier ce qui pourrait être utile à la communauté scientifique et aux gestionnaires qui s'intéressent aux bassins versants urbains.

Le présent papier est une synthèse des retours d'expérience que l'équipe RIVER du LTHE a pu acquérir sur la mesure par turbidimétrie en rivière au cours des trois dernières années. Ce travail a été réalisé en grande partie dans le cadre des projets EC2CO-Variflux et ANR-STREAMS et en collaboration étroite avec EDF. En particulier, seront présentés les différents capteurs utilisés et les difficultés à les calibrer. Ainsi nous aborderons le problème de la position du capteur, de la fréquence d'échantillonnage et de l'asservissement à des préleveurs automatiques pour valider cette approche. Enfin, nous évoquerons l'utilisation des mesures turbidimétriques pour le calcul des flux de pollution (carbone organique).

1. Les terrains d'étude

Plusieurs bassins versants de montagne dans les Alpes françaises et dans les hauts plateaux volcaniques du Michoacán (Mexique) ont été équipés pour la mesure des concentrations en MES par turbidimétrie (tableau 1). La taille des bassins versants varie de 20 km² (sous bassin du Galabre dans le bassin de la Bléone, Alpes de hautes Provence) à 5570 km² (bassin de l'Isère à Grenoble). L'ensemble de ces bassins présentent localement des terrains à très forte érodabilité et sont, pour certains, aménagés de retenues hydroélectriques ou de production d'eau potable aux exutoires.

Tableau 1 : Caractéristiques des bassins versants instrumentés par turbidimétrie

	Superficie (km²)	Altitude (m)	Climat	Précipitation (mm)	Géologie	Concentration MES max observée
Bléone (Alpes France)	De 20 à 655	400- 2800	Montagneux méditerranéen	~1000	Sédimentaire, Marne et calcaire	150 g/L
Isère (Alpes France)	5570	200- 3800	Pluvio-nival	~800	Schiste, marne et gypse, granite, gneiss calcaire en aval	50 g/L
Rio Grande (Mexico, Michoacán)	650	2000- 3500	Sub-humide tempéré	~900	Volcanique, andésite	30g/L

2. Les types de capteurs

Il existe une littérature fournie sur l'utilisation des turbidimètres, regroupés sous le terme anglo-saxon Optical Backscatters Sensors (OBS) (Downing, 2006). Leurs applications concernent des milieux variés (zones côtières, estuaires, rivières, réseaux d'assainissement, etc...). Le principe de mesure repose sur la retro-diffusion par les MES d'une source lumineuse émise par le capteur. La forte sensibilité de la réponse aux types de sédiments et à leur granulométrie rend indispensable la calibration site à site. Ce point est particulièrement critique en rivière où la variété des types de sédiments est très étendue. Cette étape est généralement réalisée in situ par le couplage du turbidimètre avec un limnimètre et un prélèvement manuel ou automatique. Dans ce dernier cas, l'asservissement du préleveur automatique peut se faire soit sur la mesure des hauteurs d'eau, soit sur la mesure de turbidité. Une courbe de calibration MES/turbidité est alors obtenue.

Au vue des concentrations très élevées rencontrées dans les rivières étudiées (de quelques grammes à plus d'une centaine de grammes par litre), notre choix s'est tourné vers des capteurs à hautes gammes de concentration. Les capteurs Hach Lange SSC 50 g/L et WTW Visolid 700 IQ sensor 1000 g/L ont été testés et sont utilisés en routine sur nos sites. Pour les sites français, l'acquisition des données est réalisée à un pas de temps défini (10 à 30 minutes sur nos sites) à partir d'une centrale d'acquisition Campbell (CR 800). La centrale contrôle le déclenchement des préleveurs automatiques (ici de type ISCO 3700, Teledyne) pour des valeurs définies de turbidité. Pour le site mexicain, un opérateur effectue un prélèvement manuel à heure fixe deux à trois fois par jour. Les turbidimètres utilisés sont munis d'un nettoyage automatique (balai essuie-glace dans le cas du capteur Hach Lange et ultrason dans le cas du WTW) qui assure la propreté de la vitre de visée optique. Cependant des encrassements particuliers tels la précipitation de calcite, l'envasement, l'obstruction par des

débris flottants, le développement d'algue ou encore le passage répété de macroinvertébrés devant la fenêtre de visée, nécessitent un contrôle régulier sur le terrain.

3. Où, comment et quand mesurer ?

3.1 La position du capteur

La position du capteur est un point important à considérer au moment de l'implantation du turbidimètre. La mesure est réalisée en un point fixe de la section de rivière. Ce point est considéré comme représentatif de la section. Il est donc préférable de choisir une section stable dans le temps, ce qui est difficile dans les rivières en tresse où des déplacements du point de mesure sont souvent nécessaires pour maintenir le capteur en eau courante. La crépine du préleveur automatique et le turbidimètre sont placés côte à côte pour minimiser les sources d'erreur liées à la possible hétérogénéité des MES au niveau de la section de contrôle. Il apparaît essentiel de choisir le site de manière à éviter les zones de fort gradient de concentration latérale (méandres, confluences) ou verticale (zone d'influence hydraulique en amont de barrages). Idéalement, un test de la distribution des concentrations en MES dans la section peut s'avérer rassurant pour valider un site de mesure (Figure 1). Dans le cas présenté, la section de l'Isère à Grenoble a été échantillonnée toutes les heures lors d'un événement de crue en trois points de surface (manuellement au seau) et un point en profondeur (à la position du préleveur automatique). Le résultat met en évidence une bonne homogénéité des concentrations des MES dans la section (variation < 10 % en moyenne entre les points les plus éloignés, Mano, 2008) et valide le site de mesure. Cette expérience assez lourde (en temps et en personnel) a pu être réalisée grâce à l'anticipation de la connaissance de l'événement de crue (ici une chasse planifiée d'entretien des retenues hydroélectriques EDF de l'Arc en amont de Grenoble). A défaut, l'inversion du signal acoustique retro-diffusé d'un ADCP (utilisé en rivière pour les mesures de débits) constitue une bonne alternative pour l'estimation de la variabilité des concentrations en section de rivière (Le barbu, 2008). Cette procédure est en cours de développement. Si les résultats permettent une comparaison qualitative des MES en section et donc une validation de l'hypothèse d'homogénéité des MES, son utilisation pour déduire des flux sédimentaires réels fait l'objet d'effort de recherche au sein de la communauté scientifique.

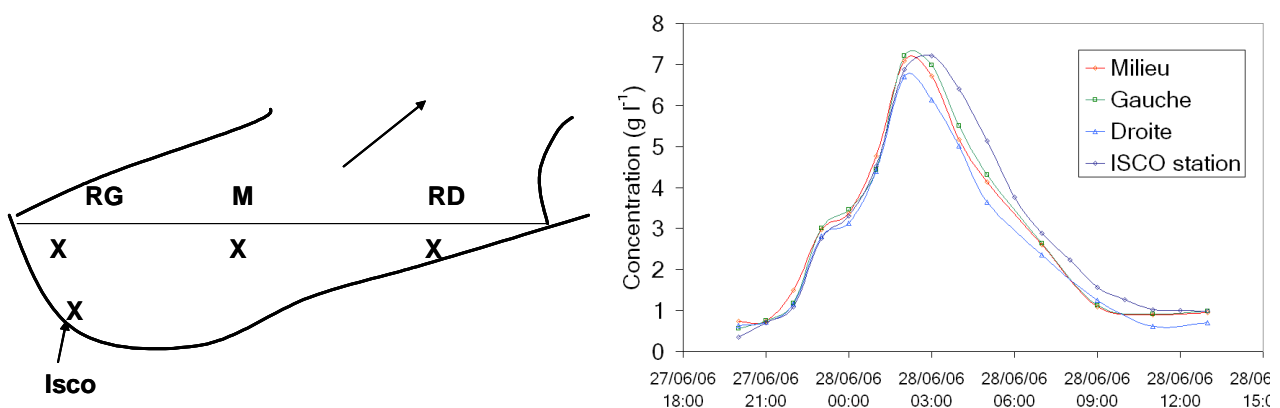


Figure 1 : Echantillonnage in situ de la section de l'Isère à Grenoble (RD : rive droite, M : milieu, RG : rive gauche et Isco : fond) lors d'une chasse annuelle d'entretien des retenues hydroélectriques EDF de l'Arc (d'après Mano 2008)

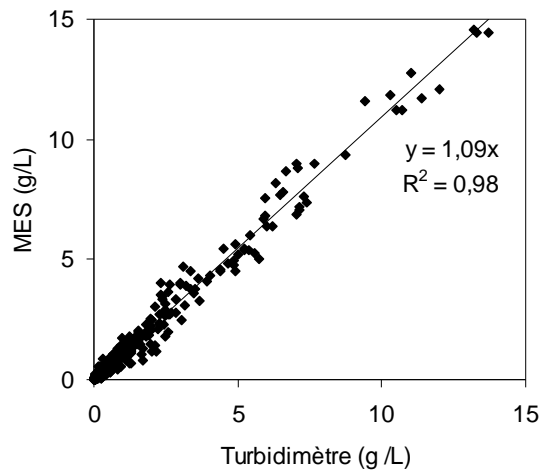
3.2 La calibration du capteur

La calibration du turbidimètre est un point essentiel. Les sondes du marché sont généralement calibrées à l'aide d'un matériau homogène (de la silice SIO₂ par exemple). Les données sont éventuellement convertibles en gMES/L par une calibration « constructeur ». Au vu de la diversité des particules (forme, densité, couleur, granulométrie) qui transitent dans les rivières, il est rare que la valeur « constructeur » soit adaptée. D'où la nécessité de calibrer in situ la sonde pour chaque site de mesure. Idéalement la calibration est réalisée sur l'ensemble de la gamme de concentrations rencontrées sur le site de mesure. Ceci n'est pas sans poser quelques difficultés quant à l'échantillonnage anticipé des pics de MES. L'automatisation des prélèvements permet d'échantillonner toutes les crues et assure une calibration des turbidimètres sur une gamme très étendue de concentration. A défaut, un prélèvement manuel répété permet une calibration du turbidimètre sur une gamme de concentration restreinte. Les MES sont analysées en laboratoire par filtration/pesée ou pesée d'un aliquote seul si l'échantillon est très concentré et séché à 105 °C (AFNOR, T90-105, 1994).

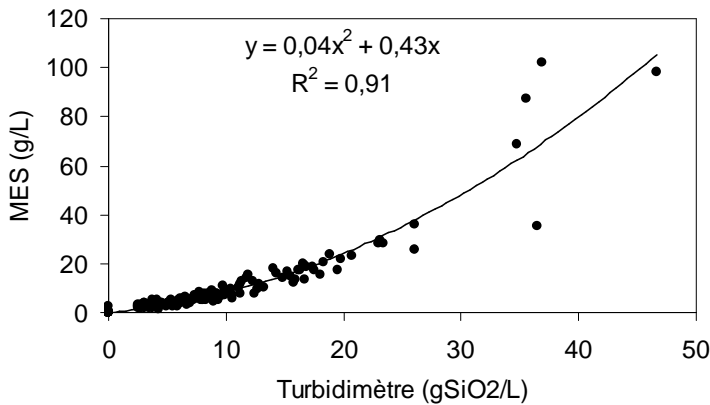
3.3 Asservissement à la turbidité ou au seuil de hauteur d'eau ?

Le déclenchement du préleveur automatique peut être contrôlé par le turbidimètre lui-même ou par un capteur de hauteur d'eau. Le choix d'un asservissement à la turbidité ou à la hauteur d'eau est fonction du régime hydrologique de la rivière étudiée, et de la durée des crues. Pour nos sites en rivière, l'asservissement à la turbidité a été choisi. Sur l'Isère (grand bassin versant) la durée moyenne des crues est de l'ordre de quelques jours. Il a donc été préféré un asservissement sur la turbidité pour éviter le prélèvement d'un trop grand nombre d'échantillons qui ne sont pas systématiquement très concentrés en MES. Le seuil de déclenchement de l'échantillonneur a été fixé à 3 g/L et le pas de temps à 1 heure lors des crues. Cette stratégie a été complétée par un échantillonnage quotidien en routine qui a permis de couvrir la gamme inférieure à 3 g/L. Un protocole similaire a été utilisé sur le bassin de la Bléone avec des seuils de turbidité choisis en adéquation avec les concentrations observées sur le site et la durée des événements. Cette fois ci, deux seuils de turbidité ont été fixés par station et associés à différentes cadences de prélèvement ; plus le seuil est élevé, plus la cadence est rapide. Ces seuils sont par exemple de 2.5 g/L et 5 g/L, avec une cadence respective de 2 heures et 1 heure. Cette méthode permet d'échantillonner la plupart du temps tous les événements de crue à l'aide des 24 flacons disponibles dans le préleveur automatique. Sur le site mexicain, le turbidimètre a fréquemment fait l'objet d'une obstruction par des dépôts végétaux flottants (végétation arrachée des berges) induisant une augmentation artificielle de la concentration au-delà du seuil de déclenchement du préleveur et donc une séquence d'échantillonnage inopinée. Si bien que l'asservissement d'un préleveur automatique sur la mesure de turbidité n'était pas envisageable et que le prélèvement manuel a été préféré.

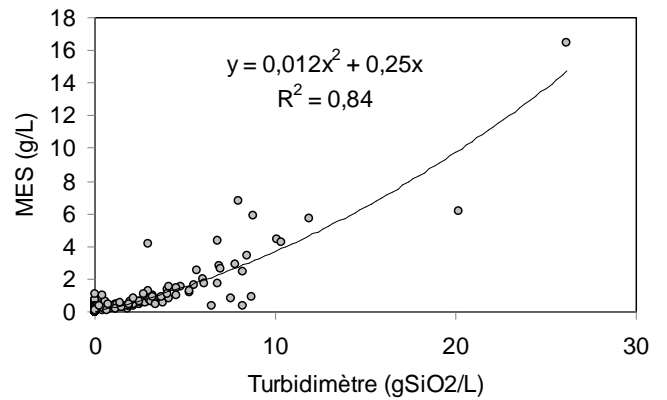
3.4 Les courbes MES/turbidité et l'estimation de l'erreur sur la mesure



a)



b)



c)

Figure 2 : Courbes de calibration réalisées a) sur l'Isère (capteur Hach Lange 0-50 g/L et asservissement) b) sur le Bès, bassin de la Bléone (capteur WTW Visolid 1000 g/L et asservissement) c) sur le Rio Grande (capteur WTW Visolid 1000 g/L et prélèvements manuels)

Sur le site de l'Isère la calibration du turbidimètre Hach Lange est de très bonne qualité sur toute la gamme de concentration (Figure 2a). Dans ce cas la calibration « constructeur » est très acceptable (variation de 10 %). Ceci s'explique par la faible variation granulométrique des MES transportées par l'Isère (d_{50} entre 21 et 27 μm sur un événement de crue, Mano, 2008) et par la bonne circulation de l'eau devant le capteur. L'asservissement a permis de couvrir la gamme de concentration rencontrée durant plusieurs années hydrologiques. Cependant la relation est de moins bonne qualité pour les faibles concentrations (Tableau 2). Dix huit répétitions sur un même échantillon ont permis d'évaluer l'erreur à $\pm 3\%$ sur la mesure laboratoire des concentrations en MES (Mano, 2008).

Sur chacun des sites de la Bléone, nous avons pu estimer des courbes de calibrations pertinentes pour la majeure partie des événements de crue observés (Figure 2b). Cependant, pour quelques événements hydrologiques (en particulier les crues d'orage au printemps et en été), ces courbes de calibrations globales n'étaient alors pas satisfaisantes. Il a alors été nécessaire, pour ces événements particuliers, de calibrer la sonde individuellement pour chaque événement observé. Cette dispersion par rapport à la courbe de calibration globale peut s'expliquer par le fait que lors des crues d'orage, les sédiments transportés sont souvent

de nature très différente selon la localisation des précipitations. Ces observations montrent ainsi la nécessité d'assurer des prélèvements en continu sur les bassins de montagne de petite et de moyenne taille, même lorsqu'une courbe de calibration fiable a pu être établie. L'erreur produite, si l'on ne considère que la courbe de calibration globale à l'échelle annuelle est faible (de l'ordre de 5% sur l'estimation des flux de MES) ; par contre à l'échelle événementielle, cette erreur est significative (de l'ordre de 20%, jusqu'à 45% sur les quantités transportées au cours d'une crue).

Sur le site mexicain, la courbe MES/turbidité est également satisfaisante (Figure 2c). Cependant, le prélèvement manuel n'a pas permis de récolter beaucoup d'échantillons pour des fortes valeurs de concentration. De plus le prélèvement sur place est réalisé par un opérateur extérieur (habitant qui vit à proximité du site de mesure). La dispersion observée sur les valeurs > 2 g/L (Tableau 2) peut être expliquée par un prélèvement asynchrone lié à des approximations dans l'heure de prélèvement par l'opérateur. Ce point est à souligner car la construction de la courbe MES/turbidité nécessite un phasage temporel précis entre la mesure turbidimétrique et la mesure manuelle. Le recours à l'asservissement permet de s'affranchir de ce type de biais.

Tableau 2 : Mise en évidence de la dispersion de la relation MES/turbidité : erreur relative entre la mesure de MES par pesée et le calcul des MES à partir de la relation MES/turbidimètre sur trois gammes de concentrations

Site	< 0,2 gMES/L	0,2-2 gMES/L	> 2 gMES/L
Isère	30 %	25 %	10%
Bès (bassin de la Bléone)	60%	50%	30%
Rio Grande	98 %	66 %	31 %

Pour ce type de capteurs à haute gamme de concentration (Hach ou WTW), il n'est pas surprenant d'observer une dispersion plus forte dans les faibles concentrations (Tableau 2). Cette dispersion diminue au fur à mesure que les concentrations augmentent. C'est finalement rassurant d'obtenir une estimation plus proche de la « réalité » pour les fortes concentrations qui constituent l'enjeu de ces mesures. Quelque soit la méthode retenue, la construction de la courbe de calibration MES/turbidité devient statistiquement stable que lorsqu'un très grand nombre de couple MES/turbidité a été mesuré.

3.4 Qualité de l'estimation du flux par turbidimétrie par rapport à un échantillonnage discret « classique »

Une fois la calibration de la sonde de turbidité réalisée, il est possible d'utiliser les longues chroniques de mesure en continu pour le calcul des flux annuels (Figure 3). Le calcul se fera par multiplication de la concentration en MES déduite de la courbe MES/turbidité par le débit instantané. Le flux « vrai » de MES est alors obtenu et utilisé pour estimer l'erreur faite sur la calcul de flux à partir d'un échantillonnage discret (Figure 3). Sur l'exemple ci-dessous, il a été déterminé qu'un échantillonnage instantané sub-journalier à journalier est nécessaire pour un calcul fiable des flux de MES sur l'Isère.

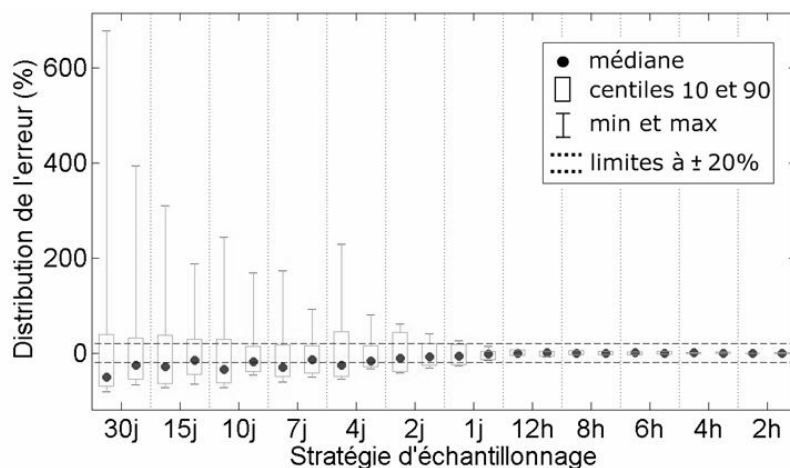


Figure 3 : Estimation de l'erreur faite sur le calcul du flux annuel de MES sur l'Isère selon la fréquence d'échantillonnage. La référence est donnée par le flux calculé à partir du suivi turbidimétrique haute fréquence (d'après Mano, 2008)

4. Utilisation de la turbidité pour reconstituer les flux de pollution particulaire

De nombreux « polluants » particuliers (métaux, matière organique, phosphore) sont transportés par les MES dans les rivières. Les flux particuliers sont généralement du même ordre de grandeur que les flux dissous. L'exemple ci-dessous illustre la possibilité d'utiliser les mesures turbidimétriques pour reconstituer les flux de Carbone Organique Particulaire (COP) en rivière. En vue d'estimer les flux de COP de l'Isère à Grenoble, un suivi hebdomadaire manuel, complété par des échantillons en crue, a été réalisé sur la période 2006-2008. La relation empirique et non linéaire entre la concentration en MES et le % COP dans les MES (figure 4a) s'écrit :

$$\% \text{COP} = 28,82 * (\text{MES}^{-0,7499}) + 0,8885 \quad [1]$$

MES = concentration instantanée en MES (mg/L)

0,8885 = minimum % COP obtenu pendant les crues

Cette relation peut alors être utilisée pour calculer les flux de COP à partir des mesures en continu de MES déduites de la courbe MES/turbidité. Cette reconstitution a permis d'affiner le calcul du flux de COP et d'estimer au mieux le transport de carbone particulaire par la rivière (Némery et al, in prep).

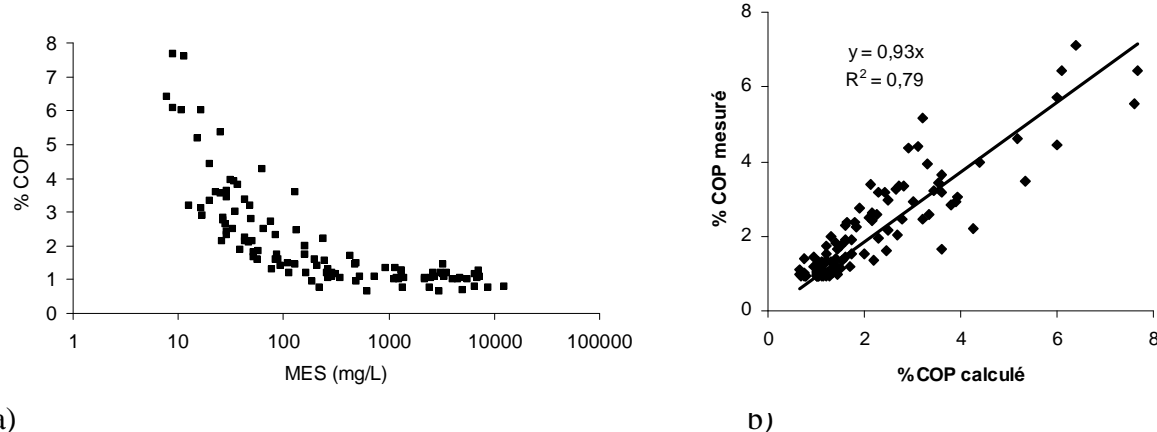


Figure 4 a) Relation entre la concentration en MES et le % COP mesuré dans les MES (données sur l'Isère période 2006-2008) b) relation entre le % COP mesuré et le % COP calculé à partir de l'équation [1]

Conclusions

Le caractère épisodique et très localisé des événements hydrologiques et les cycles journaliers de variation des concentrations de MES observés dans les bassins versants de montagne a conduit progressivement la communauté scientifique et les gestionnaires à utiliser les sondes turbidimétriques pour la mesure en continu des concentrations en MES. Les capteurs existants sur le marché permettent de couvrir de hautes gammes de concentrations (plusieurs dizaines à centaines de grammes par litre). La précision de ce type de capteurs est, en relatif, meilleure pour les fortes concentrations que pour les faibles si on exclut le risque de passage en "hors gamme" par saturation du turbidimètre. Aussi comme la majorité du transport sédimentaire est assuré en crue, le turbidimètre s'avère un outil fiable pour le calcul des flux annuels ou événementiels en rivière de montagne. Cependant, une réflexion sur le choix du site d'installation et la calibration in situ du capteur sont nécessaires. De plus il est difficile de s'affranchir d'une maintenance régulière du capteur sur le site, qui selon les conditions de sites, peut s'encrasser très vite. L'asservissement à un préleveur automatique est nécessaire. Il permet l'échantillonnage des pics de concentrations en crue et assure une courbe MES/turbidité de qualité (globale ou par événement). Il est alors possible d'estimer la précision des estimations de flux. Outre l'intérêt d'avoir une bonne estimation du flux de MES, la mesure en continu permet également de valider (ou réfuter) une stratégie d'échantillonnage fréquentiel discret (suivi hebdomadaire, journalier, sub-journalier) et aussi de reconstituer des flux de substances particulières dans le cas où une relation a été établie entre la concentration en MES et la teneur de l'éléments considéré (ici le carbone organique particulaire). Il faut noter que cette instrumentation « type » a un coût estimé à 10-12 Keuros dans le cas des sites d'études présentés (turbidimètre, préleveur automatique, capteur de niveau d'eau, centrale d'acquisition, alimentation électrique). Enfin, dans le cas de la Bléone et de l'Isère ces mesures sont télétransmises vers Grenoble ce qui assure un suivi en temps réel et facilite la gestion de la maintenance des stations.

Remerciements : Ce travail a été réalisé dans le cadre de projets financés par les programmes INSU (EC2CO-CYTRIX/Variflux) et ANR-Blanc (STREAMS) et en étroite collaboration avec EDF-DTG.

Références bibliographiques :

- Coynel, A., Schäfer, J., Blanc, G. & Bossy, C., 2007. Scenario of particulate trace metal and metalloid transport during a major flood event inferred from transient geochemical signals. *Applied Geochemistry*, n° 22 (4), p. 821-836.
- Downing, J., 2006. Twenty-five years with OBS sensors : The good, the bad and the ugly. *Continental Shelf Research*, n° 26, p. 2299-2318.
- Le Barbu, E., 2008. Mesure hydro-acoustique des flux de matières en suspension (MES) dans les cours d'eau. Rapport de PFE ENSHMG (*collaboration Cemagref Lyon*).
- Maneux, E., Probst, J.L., Veyssy, E. & Etcheber, H., 2001. Assesment of dam trapping efficiency from water residence time : application to fluvial sediment transport in the Adour, Dordogne and Garonne river basins (France). *Water Ressource Research*, n° 37 (3), p. 801-811.
- Mangon H. 1869. Expérience sur l'emploi des eaux dans l'irrigation et sur les limons charriés par les cours d'eau. Librairie des corps impériaux des Ponts et Chaussées et des Mines. *Dunod Editeur, Paris*. 198 p.
- Mano, V., 2008. Processus fondamentaux conditionnant des apports de sédiments fins dans les retenues : optimisation des méthodes d'estimation des flux et modélisation statistique. Thèse de doctorat de l'Université UJF-Grenoble. 312 p.
- Mano, V., Némery, J., Belleudy, P. & Poirel, A., 2009. Suspended Particle Matter dynamics in four alpine watersheds (France): influence of climatic regime and optimization of flux calculation. *Hydrological Processes*, n° 23, p. 777-792.
- Mathys, N., Brochot, S., Meunier, M. & Richard, D., 2003. Erosion quantification in the small experimental catchments of Draix (Alpes de Hautes Provence, France). Calibration of the ETC rainfall-runoff-erosion model. *Catena*, n° 50, p. 527-548.
- Meybeck, M., Laroche, L., Dürr, H. & Syvitski, J.P.M., 2003. Global variability of daily suspended solids and their flux in rivers. *Global and Planetary Change*, n° 39, p. 65-93.
- Moatar, F., Person, G., Meybeck, M., Coynel, A., Etcheber, H., Crouzet, P. 2006. The influence of contrasting suspended sediment matter transport regims on the bias and precision of flux estimation. *Science of the Total Environment*, n° 370, p. 515-531.
- Muntz et Lainé, 1913. Les matériaux charriés par les cours d'eau des Alpes et les Pyrénées. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences. Séance du 17 mars*. T. 156, p. 848
- Némery, J. & Garnier, J., 2007. Origin and fate of phosphorus in the Seine watershed (France) : The agricultural and hydrographic P budget. *JGR-Biogeosciences*, n° 112 G03012, doi:10.1029/2006JG000331.
- Syvitski, J.P.M., Vörösmarty, J.V., Kettner, A.J. & Green, P. 2005. Impacts of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, n° 308 p. 376-380
- Vörösmarty, J.V., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P., Syvitski, J.P.M. 2003. Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, n° 39 (1-2), p. 169-190.

Némery Julien, Mano V., Navratil O., Gratiot Nicolas, Duvert C., Legout C., Belleudy P., Poirel A., Estèves Michel

Retour d'expérience sur l'utilisation de la turbidité en rivière de montagne

TSM.Techniques Sciences Méthodes, 2010, (1-2), p. 61-68.

ISSN 0299-7258