

Mesure en continu de la concentration en matières en suspension dans des petits cours d'eau par turbidimétrie

Nicolas Gilliet¹, Ophélie Fovet¹, Catherine Grimaldi¹, Mamadou Ndom¹

Résumé. Les sondes turbidimétriques sont de plus en plus utilisées par la communauté scientifique pour le suivi du transport des matières en suspension dans les petits cours d'eau. Les concentrations en matières en suspension (MES) peuvent y être élevées et les événements hydrologiques rapides. De plus, les conditions de mesure sont parfois difficiles par exemple : lit du cours d'eau étroit, nombreux débris végétaux, faible hauteur d'eau et site sans réseau électrique. Deux petits bassins versants agricoles ont été instrumentés avec des sondes turbidimétriques afin d'y mesurer les flux de MES en continu. Cette méthode nécessite au préalable d'établir une corrélation entre les valeurs de turbidité mesurées et les concentrations en MES, obtenues à partir de nombreux échantillons filtrés en laboratoire. Cet article présente un retour d'expérience sur l'instrumentation et la méthode pour construire la relation MES / turbidité. Différents tests métrologiques ont permis de valider la représentativité de cette méthode appliquée à notre contexte : la technique d'échantillonnage de l'eau, la filtration des échantillons, la maîtrise du signal de la mesure de turbidité. L'utilisation de turbidimètre nécessite un traitement de données assez long pour détecter et corriger les erreurs. La relation MES / turbidité a été établie uniquement à partir de valeurs de turbidité identifiées comme fiables. Les résultats ont montré que, pour les deux bassins versants, la turbidité permet d'évaluer correctement la concentration en MES à partir d'une régression linéaire simple ($R^2=0,86$) dans un cas et d'une régression linéaire à double pente dans l'autre ($R^2=0,71$ et $0,76$).

Mots clés : turbidité, concentration en MES, étalonnage, petits cours d'eau

Introduction

Les matières en suspension (MES) participent à la dégradation des écosystèmes aquatiques, par réduction de la pénétration de la lumière, détérioration des branchies des poissons et colmatage des habitats (Scheurer et al., 2009). De plus, les MES transportent potentiellement sous forme adsorbée des polluants, le phosphore et les métaux lourds (Kronvang et al., 2003 ; Viers et al., 2009 ; Dupas et al., 2015 a et b).

Pour étudier ces conséquences sur l'environnement, le suivi des matières en suspension a été mis en place depuis 2002 notamment dans deux petits cours d'eau qui sont en tête de bassins versants agricoles des Observatoires de Recherche en Environnement AgrHyS (http://www6.inra.fr/ore_agrhys) et Petits Fleuves Côtiers (<https://www6.inra.fr/ore-pfc>). La particularité de ces petits cours d'eau est d'être proches des sources d'érosion (berges et sols) ; les événements de pluie et de ruissellement y sont courts, mais peuvent produire de fortes concentrations en MES liées aux conditions hydrologiques (caractéristiques des averses, état hydrique du bassin versant) et également au calendrier des travaux agricoles.

Dans ce type de cours d'eau, quelques événements seulement peuvent entraîner plus de 50% du flux annuel de MES (Lefrancois et al., 2007a ; Vongvixay, 2012). De plus, ces événements sont assez rapides (de quelques

¹ INRA, UMR SAS, INRA, Rennes, France

Nicolas.gilliet@inra.fr Ophelie.fovete@inra.fr grimaldicat@orange.fr Mamadou.ndom@inra.fr

heures à quelques jours) d'où la nécessité de mettre en œuvre une instrumentation capable d'assurer la continuité de l'acquisition des mesures de concentrations en MES, indispensable pour quantifier les flux de sédiments dans ce type de bassins versants.

Pour cela, la méthode couramment utilisée consiste à mesurer la turbidité de l'eau en continu c'est-à-dire à fréquence rapide (<1 h) avec un turbidimètre et ensuite d'utiliser une relation établie pour le site d'étude entre la turbidité et la concentration des MES. La turbidimétrie est une méthode normalisée (NF EN ISO 7027 de mars 2000) et décrite dans la littérature (Versini et al., 2015). Cependant son application dans des petits cours d'eau nécessite un travail métrologique important. En particulier, la faible hauteur d'eau du cours d'eau, et la disponibilité ou non d'une alimentation électrique complexifient l'installation d'une station de mesure.

Cet article présente un retour d'expérience sur la mesure des MES par turbidimétrie réalisée dans deux petits cours d'eau aux cours des quinze dernières années. La première partie détaille l'instrumentation et la méthodologie. La seconde partie présente les résultats aux différents tests métrologiques. Enfin les relations MES / turbidité obtenues et leur construction sont discutées.

Choix du matériel et adaptations aux contraintes du terrain

Les cours d'eau d'étude

Deux cours d'eau, le Moulinet (50) et le Coët-Dan (56), ont été équipés pour la mesure des concentrations en MES par turbidimétrie (**Figure 1** et **Tableau 1**). Les mesures ont débuté en 2002 pour le Moulinet et en 2004 pour le Coët-Dan et se poursuivent actuellement (Lefrancois 2007a et b ; Vongvixay 2012).

Ces deux bassins d'ordre de Strahler égal à 2 et de surface semblable (environ 5 km²) présentent des caractéristiques climatiques (tempéré océanique) et géologiques (schistes briovériens) semblables mais des caractéristiques contrastées vis-à-vis du risque d'érosion, c'est pourquoi ils ont été instrumentés de pair. Les pentes sont modérées dans les deux bassins : de 5 à 13% sur le bassin du Moulinet et moins de 5% sur le bassin du Coët-Dan. Le Moulinet draine un bassin d'élevage laitier bocager avec 60% de surface en prairie et 40% de cultures (maïs et céréales) et 76 m/ha de haies. Les berges étaient toutefois fortement dégradées par l'accès du bétail au cours d'eau jusqu'en 2009 où de gros travaux de re-végétalisation et la construction d'abreuvoirs ont été réalisés pour réhabiliter ces berges. Le Coët-Dan draine un bassin de poly-cultures-élevages bovin-lait et porcin, remembré dans les années 70 avec 16% de surface en prairie, 84% de cultures et 46 m/ha de haies, localisées principalement le long du cours d'eau (Dupas et al., 2015a et b)



Figure 1. Localisation des sites d'étude.

Tableau 1. Caractéristiques du Moulinet et du Coët-Dan et des stations correspondantes

	Le Moulinet	Le Coët-Dan
Aire drainée	4.5 km ²	4.9 km ²
Longueur	5 km	7 km
Pente	1,6 %	1%
Largeur au point de mesure	1,5 m	2 m
Débit minimal étiage estival	10 l/s	assec
Débit maximal crue hivernale	570 l/s	1200 l/s
Hauteur d'eau minimale au point de mesure	< 15 cm	< 15 cm
Hauteur d'eau maximale au point de mesure	1 m	1 m

Le choix des turbidimètres

Pour le Moulinet, non desservi par le réseau électrique, le choix du matériel de mesure était très limité. En effet, la plupart des turbidimètres, équipés notamment d'écran d'affichage rétroéclairé, sont consommateurs en énergie et requièrent une alimentation en 230 volts.

Pour les deux cours d'eau, le choix s'est donc porté sur un turbidimètre à poste fixe de chez PONSEL qui est composé d'une sonde de turbidité, d'un boîtier pour le nettoyage automatique de la sonde et d'un transmetteur (**Figure 2**). Le modèle de la sonde est PONCIR-TU20-NA-10 et le modèle du transmetteur est APF-TU-TRANS.

Ce turbidimètre fonctionne sur le principe de mesure d'opacimétrie, adapté à une faible hauteur d'eau. De plus, il est alimenté en 12 volts et consomme peu de courant. Une batterie 12 Volts 40 Ah sans adjonction de panneau solaire, permet une autonomie de quatre semaines minimum.

La gamme de mesure est comprise entre 0 et 2000 FTU avec une précision annoncée par le constructeur de $\pm 5\%$ de la valeur mesurée. La sonde est équipée d'un système de nettoyage automatique par piston racleur. La fréquence de nettoyage est paramétrée à 60 min, ce qui correspond à la fréquence la plus lente proposée.

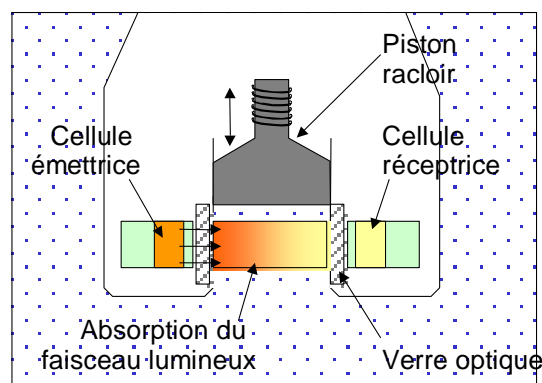


Figure 2. Turbidimètre Ponsel et son principe de mesure.

Sur le transmetteur, un petit écran LCD indique la mesure instantanée. Les réglages du capteur se font à partir d’empreinte de tournevis actionnant des potentiomètres. Il y a deux potentiomètres pour l’étalonnage (offset et pente) et un potentiomètre dit « d’amortissement » qui permet de rendre plus stable ou plus réactive la réponse du capteur. Ce potentiomètre est particulièrement délicat à manipuler car il n’y a aucun repère de graduation. Sur nos sites il a été réglé de façon à avoir une mesure plutôt réactive.

Le turbidimètre Ponsel a fonctionné sur le Moulinet entre 2002 et 2015 et sur le Coët-Dan entre 2004 et 2012. A partir de 2012, sur le Coët-Dan, la partie transmetteur a été remplacée par un modèle plus récent, nommé Actéon 2000 (**Figure 3**). La sonde et le système de nettoyage automatique sont restés identiques. Avec ce nouveau transmetteur, avant chaque enregistrement, la mesure est obtenue à partir d’une moyenne de plusieurs mesures réalisées chaque seconde. Le réglage de ce nombre de mesures correspond au réglage de l’amortissement sur l’ancien transmetteur, et peut varier entre 5 et 100 mesures. Celui par défaut (10 mesures) a été conservé. Cela signifie que la valeur enregistrée est la moyenne de la mesure sur les dix dernières secondes, une mesure par seconde. C’est un réglage qui correspond plutôt à une mesure réactive et peu lissée.

Grâce à son afficheur et ses fonctionnalités, le transmetteur Actéon 2000 est beaucoup plus « transparent » que la version précédente, et a nettement amélioré la maîtrise de la mesure. Par contre, il a une forte consommation électrique, notamment car l’afficheur du transmetteur est rétroéclairé constamment, et doit donc être alimenté à partir du réseau électrique en 230 volts.



Figure 3. Transmetteur Actéon 2000.

Positionnement et fixation du capteur dans la section mouillée

Le capteur de turbidité est suspendu dans l’eau à l’aide d’un portique qui enjambe le cours d’eau (**Figure 4**). Latéralement le capteur est positionné dans l’écoulement principal pour éviter les zones mortes près des berges. Un guide métallique permet de régler la profondeur de la sonde dans l’eau selon les saisons. Vu le faible niveau des cours d’eau, on considère que le point de mesure au niveau du capteur est représentatif de la section mouillée si le capteur est positionné dans la partie supérieure de la colonne d’eau, soit la plus circulante, tout en conservant un minimum d’eau au-dessus des optiques de mesure. Concrètement, les cellules de mesure du capteur sont placées à environ 10 cm en dessous la surface de l’eau.



Figure 4. Fixation de la sonde de turbidité sur le ruisseau du Coët-Dan.

Fréquence de mesure et enregistrement

La fréquence d'enregistrement de chaque mesure est actuellement de 10 min mais a varié au cours des années en fonction des besoins.

Les valeurs mesurées par les turbidimètres sont enregistrées avec une centrale d'acquisition Logosens 2 de chez OTT, ce qui permet notamment de centraliser les données, d'avoir un calage temporel, de déclencher l'échantillonnage automatique, et de récupérer les données à distance via un modem.

Le transfert des données entre le turbidimètre et la centrale d'acquisition se fait par un signal analogique 4-20 mA. C'est un signal qui subit des perturbations électriques au cours du temps donc la valeur enregistrée par la centrale peut différer sensiblement de celle mesurée par le turbidimètre. Pour limiter ce biais, l'Actéon 2000 permet d'ajuster le signal 4-20 mA envoyé et donc contrôler la correspondance des mesures. Ce contrôle est réalisé une fois par mois systématiquement et l'ajustement est réalisé si nécessaire.

Maintenance et étalonnage des turbidimètres

Un nettoyage manuel de la sonde du turbidimètre est réalisé *in situ* deux fois par mois et consiste à enlever les éventuels débris accumulés et à frotter avec un chiffon doux les optiques de mesure.

Un étalonnage à la formazine et un ajustage des turbidimètres doivent être effectués régulièrement pour contrôler une possible dérive de la mesure dans le temps. Cette procédure est réalisée en laboratoire à la réception du matériel pour s'affranchir des différentes méthodes propres aux fournisseurs. Elle est ensuite réalisée sur site annuellement où il faut veiller à appliquer strictement la même méthode et dans des conditions expérimentales semblables.

L'étalonnage consiste à comparer les valeurs mesurées par le turbidimètre avec une solution standard dont la valeur de turbidité est connue. Cet étalonnage se fait en deux points, 0 et 1000 FTU, qui permettent d'ajuster si besoin respectivement l'offset et la pente. Le point à 0 FTU est obtenu avec de l'eau distillée et le point à 1000 FTU est obtenu par dilution d'une solution commerciale de formazine de la marque Hach de 100 mL à 4000 FTU. Le capteur est d'abord nettoyé. Ensuite il est plongé dans la solution à 0 FTU. Il est séché puis plongé dans la

solution à 1000 FTU. On procède d'abord à un simple contrôle des valeurs. Ensuite on recommence l'opération pour l'ajustage.

Pour nous adapter à la dimension de la sonde de turbidité, nous avons utilisé un récipient d'une hauteur de 50 cm et d'un diamètre de 10 cm. Un volume de 400 mL est adapté pour que, lorsque le capteur est immergé, la hauteur minimale de liquide au-dessus des optiques de mesure (environ 4 cm) soit respectée.

Pendant la procédure, il faut maintenir une agitation de la solution de formazine avec un agitateur magnétique et un barreau aimanté. La vitesse de rotation du barreau aimanté doit être suffisante pour que la solution de formazine soit homogène et que la mesure de turbidité soit stable, en évitant la formation de bulles d'air.

Traitement des données de turbidité

Malgré un entretien régulier sur le terrain deux fois par mois et le système de nettoyage automatique des optiques de mesure, les données de turbidité contiennent des erreurs, valeurs aberrantes et dérives.

Il est donc nécessaire de traiter les données brutes soit pour les valider, soit pour corriger les valeurs erronées. Pour cela, le logiciel commercial Hydras 3 de chez OTT est utilisé. Ensuite, la qualité de chaque donnée est renseignée, comme étant fiable ou non fiable. Les erreurs les plus courantes sont des valeurs aberrantes et des dérives.

Les valeurs aberrantes sont dues à un passage instantané ou répété de formes solides isolées devant la cellule de mesure (débris, algues, macro-invertébrés). Il en résulte que la turbidité augmente fortement le temps d'une ou deux mesures, de telles augmentations pouvant se répéter pendant plusieurs heures ou plusieurs jours (si l'objet s'accroche localement par exemple). Ces phénomènes disparaissent généralement sans intervention manuelle de nettoyage. Les données sont corrigées en utilisant les valeurs intermédiaires ou à défaut avec les valeurs précédant et suivant la période erronée par interpolation. En écoulement de base, la turbidité est relativement stable, la correction apportée induit peu d'erreur, les données sont donc validées fiables. En crue, la correction est complexe, les données sont non fiables ou effacées.

Les dérives sont dues à l'encrassement des optiques de mesure par un dépôt de biofilms. Dans ce cas, les valeurs de turbidité augmentent constamment jusqu'à ce qu'un nettoyage soit effectué. Cette dérive est corrigée en ramenant la valeur de la dernière mesure avant le nettoyage à la valeur de turbidité mesurée juste après le nettoyage des optiques (**Figure 5**). La correction depuis le début de la dérive est effectuée à l'aide d'une fonction du logiciel Hydras 3 en considérant cette dérive comme linéaire (Birgand et al., 2004). Une difficulté peut être d'identifier le début de la dérive, repérable si la turbidité mesurée augmente alors que le débit ne varie pas.

Lorsque la dérive est située sur une période d'écoulement de base (pas d'évènement hydrologique), la correction apportée est considérée fiable. En crue, les dérives peuvent être corrigées mais dans ce cas les données sont considérées non fiables.

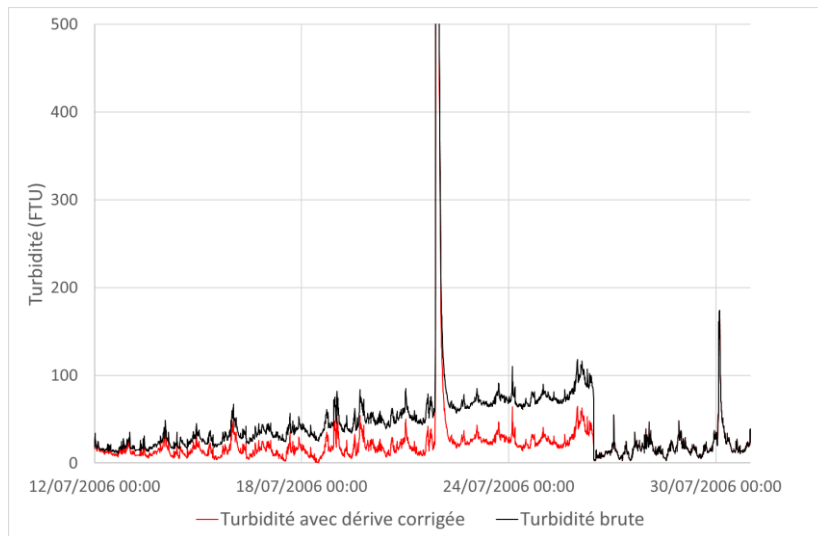


Figure 5. Correction d'une dérive de la turbidité avec la fonction « correction glissante » dans Hydras 3.

Echantillonnage dans les cours d'eau et dosage des matières en suspension

La réponse du turbidimètre est fortement sensible aux types de sédiments et à leur granulométrie (Figure 6). Ce point est particulièrement critique en rivière où la variété des types de sédiments est très étendue avec des effets saisonniers marqués.

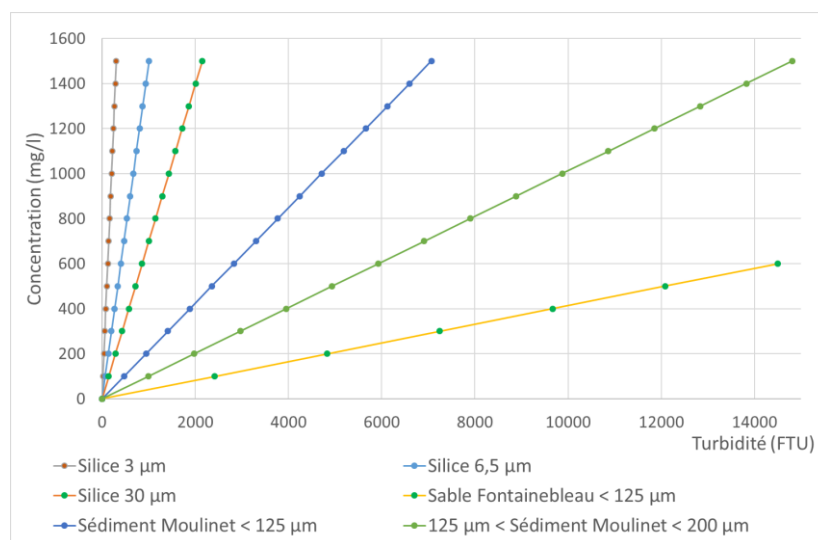


Figure 6. Turbidité mesurée par le capteur Ponsel en fonction de la concentration de particules de nature et de granulométrie différentes (mémoire de stage Nguyen, 2011).

Il n'existe donc pas de relation unique entre la turbidité et la concentration en MES. La relation entre turbidité et concentration en MES doit donc être effectuée localement, à partir d'échantillons prélevés en période de crue et hors crue, pour couvrir toute la gamme possible de concentrations. Cette relation doit être établie pour chaque station de mesure.

Les prélèvements d'eau dans les cours d'eau sont réalisés soit manuellement soit par des échantillonneurs automatiques d'eau (ici de type ISCO 3700 et ISCO 4700 FR, de chez Teledyne). Dans les deux cas, prélèvements manuels ou automatiques, l'heure de prélèvement est notée et enregistrée avec précision pour correspondre à l'heure de la mesure de la turbidité donnée par le capteur.

Les prélèvements manuels consistent à remplir deux pots de 1000 mL à proximité de la sonde du turbidimètre. Les échantillonneurs automatiques permettent de prélever lors des crues. Ils disposent de 24 bidons de 1000 mL. Leur déclenchement est contrôlé par la centrale d'acquisition, en fonction d'une hauteur d'eau seuil ou de la pente de la montée du niveau d'eau, à définir.

L'extrémité du tuyau de pompage est fixée sur le corps de la sonde de turbidimétrie. La crépine enrobant cette extrémité (fournie avec le préleveur) a été enlevée pour limiter les dépôts de sédiments au niveau du point de pompage. Dans la mesure du possible, le premier flacon prélevé par l'échantillonneur n'est pas conservé.

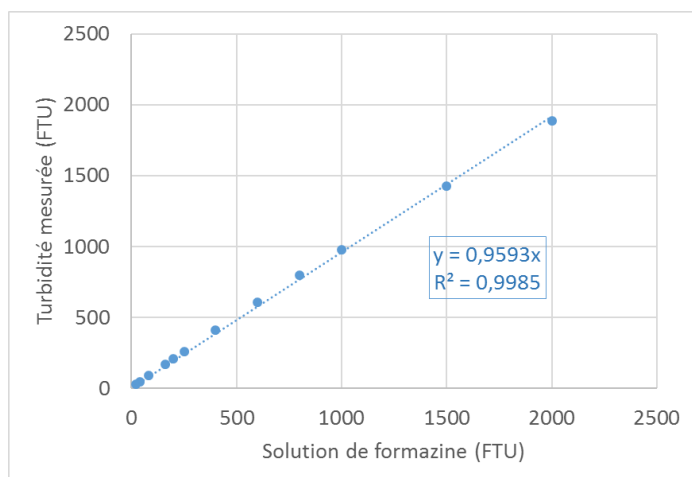
La concentration de MES dans l'échantillon est estimée, en laboratoire, après filtration sous vide à 0,45 μm , ensuite séchage à 105°C pendant une heure minimum, puis pesée en respectant le protocole défini dans la norme NF EN 872 de juin 2005. Juste avant le remplissage des récipients de filtration, les flacons sont agités pour éliminer les traces de dépôt de MES sur les parois et homogénéiser l'échantillon.

Test de validation de la méthode et résultats

Plusieurs tests ont été réalisés pour valider la méthode appliquée à notre contexte.

Test de linéarité de la mesure de turbidité

A la réception du matériel, après ajustage en deux points (0 et 1000 FTU), les capteurs ont été testés sur l'ensemble de la gamme de mesure (**Figure 7**). Cette procédure, complexe à mettre en œuvre, n'a été réalisée qu'une seule fois mais a permis de vérifier la linéarité de la réponse du turbidimètre. Les écarts de mesure sont importants pour des valeurs inférieures à 100 FTU, ce qui confirme que l'opacimétrie est un principe de mesure adaptée aux plus fortes concentrations. D'autres facteurs contribuent à l'écart de mesure comme les conditions expérimentales (température, récipient utilisé), la précision de mesure du turbidimètre ($\pm 5\%$ de la valeur mesurée), la qualité de la solution mère de formazine et la précision de sa dilution, l'agitation.



Formazine (FTU)	Ponsel (FTU)	Ecart (FTU)	% erreur
2000	1885	115	6
1500	1425	75	5
1000	979	21	2
800	799	1	0
600	607	7	1
400	412	12	3
250	260	10	4
200	210	10	5
160	169	9	6
80	89	9	11
40	47	7	18
20	25	5	25

Figure 7. Valeurs mesurées par le turbidimètre Ponsel, après ajustage.

Test de cohérence entre les deux méthodes de prélèvement : manuelle et automatique

Les deux méthodes de prélèvement, manuelle ou à l'aide d'un préleveur automatique, ont été comparées sur le cours d'eau du Moulinet en période d'écoulement de base. Un prélèvement manuel a été effectué en même temps et au même endroit que le prélèvement automatique. Pour obtenir une large gamme de valeurs de comparaison, les concentrations élevées ont été obtenues artificiellement en grattant le fond du cours d'eau suffisamment en amont du capteur pour permettre à l'écoulement de s'homogénéiser. Pour ce test, on considère que les quantités de MES dans les deux flacons sont identiques (**Tableau 2**). Il n'y a quasiment pas de différence pour les faibles concentrations mais cette différence semble augmenter pour les fortes concentrations.

Tableau 2. Résultats des concentrations en MES (mg/L) obtenues en comparant deux méthodes de prélèvement

Méthode	Prélèvement 1	Prélèvement 2	Prélèvement 3	Prélèvement 4	Prélèvement 5
Manuelle	71,7	15,5	15,1	486,7	603,6
Automatique	72,6	15,6	15,2	476,0	704,5

Test de répétabilité du dosage des MES

Pour vérifier la bonne mise en œuvre de la méthode normalisée pour le dosage des MES, un test de répétabilité a été réalisé. Pour chaque série, cinq flacons ont été remplis manuellement et en même temps dans le cours d'eau. Le dosage des MES a été réalisé sur chacun des flacons. On considère que la concentration des MES dans ces cinq flacons est identique (**Tableau 3**).

Tableau 3. Résultats des concentrations en MES (mg/L) obtenues en réalisant 3 séries de 5 prélèvements

	Série 1	Série 2	Série 3
	13,0	572,8	608,7
	13,6	581,0	605,4
	13,1	559,9	608,6
	13,5	565,2	611,1
	13,4	570,8	618,0
Moyenne	13,3	569,9	610,4
Ecart-type	0,3	8,0	4,7

Ces résultats sont satisfaisants et montrent que notre matériel de laboratoire et sa mise en œuvre répondent bien aux exigences demandées.

Test de fidélité de nos résultats de concentrations en MES

Pour tester la fidélité de nos résultats de concentration en MES, depuis 2016, dans le cadre du circuit de comparaison inter laboratoires mis en place par le Bureau interprofessionnel d'études analytiques (BIPEA), trois essais comparatifs ont été réalisés (**Tableau 4**). Pour cette gamme de faible concentration, la justesse de nos résultats est satisfaisante.

Tableau 4. Nos résultats d'inter comparaison BIPEA

Date	Valeur cible (mg/L)	Notre résultat (mg/L)	Nombre de participants	% valeurs justes	% valeurs à ± 1 mg/L	% valeurs à ± 2 mg/L	% valeurs à ± 3 mg/L	% valeurs > 3mg/L
01/02/2016	7	8	84	26%	39%	15%	10%	10%
10/10/2016	10	12	76	16%	23%	31%	19%	11%
20/04/2017	4	2	/	/	/	/	/	/
08/02/2018	18	16	94	19%	36%	12%	11%	22%

Test d'évolution des étalonnages à la formazine

Lors de l'étalonnage annuel, les valeurs avant ajustage ont été conservées (**Tableau 5**).

Tableau 5. Mesures de turbidité lors des étalonnages avant ajustage du turbidimètre installé sur le Coët-Dan

Date	Eau distillée (0 FTU)	Solution de formazine (1000 FTU)
01/04/2015	2	932
16/10/2015	-7	1080
20/09/2016	-4	1046

Le Cahier des Techniques de l'INRA 2018 (93)

L'étalonnage-ajustage annuel en deux points montre la variabilité de la dérive du matériel, mais la fréquence annuelle semble bien adaptée compte tenu des faibles écarts obtenus à chaque date.

Il est difficile de dissocier la dérive propre au capteur et l'erreur liée aux conditions expérimentales. Pour limiter ce biais, il est essentiel d'appliquer toujours la même méthode d'étalonnage et dans des conditions similaires.

Résultats du traitement des données de turbidité

Sur le Moulinet, ces résultats ont été observés sur la période 2002 à 2015 car le turbidimètre a ensuite dû être remplacé par un autre modèle de turbidimètre (**Tableau 6**).

Tableau 6. Répartition du niveau de fiabilité des données de turbidité après contrôle et correction

Qualification des données	Moulinet (depuis 2002 à 2015)	Coët-Dan (depuis 2004 à 2017)
Absence de données (cumulée)	11,4% (environ 20 mois)	9,6 % (environ 16 mois)
Fiabiles	78,8 %	59,2 %
Non fiables	17,1 %	25,8 %
Non exploitables	4,1 %	15,0 %

Sur les deux sites, les dérives sont nombreuses, principalement dues à une efficacité du système de nettoyage insuffisante. L'usure du racleur en caoutchouc et l'efficacité du nettoyage sont aléatoires.

Sur le Coët-Dan, la qualité des données est moins bonne. Ceci résulte d'une part d'un dysfonctionnement du piston racleur pendant plusieurs mois et d'autre part d'un nettoyage manuel moins fréquent (1 fois / mois). Cependant sur le Coët-Dan également, il y a globalement plus d'erreurs de mesure pendant les crues avec des valeurs aberrantes dues à des débris sur les optiques de mesure. Pour limiter ce problème, la sonde de turbidité a été déplacée en 2013 quelques mètres en aval de façon à avoir une hauteur d'eau plus importante. Dans tous les cas, un passage hebdomadaire sur site est préférable. Sur le Coët-Dan, en écoulement de base, la turbidité est particulièrement faible, entre 0 et 10 FTU. La dérive du signal 4-20 mA a parfois engendré des valeurs négatives.

Sur le Moulinet, la valeur maximale de la plage de mesure (2000 NTU) a été atteinte plusieurs fois par an, pendant quelques heures lors de crues printanières et automnales. Ces valeurs sont décrites comme non fiables car sortant de la gamme de mesure du turbidimètre donnée par le constructeur. Même si depuis 2008, ces dépassements semblent moins fréquents, peut-être le résultat des travaux de protection des berges réalisés, la gamme de mesure du turbidimètre Ponsel ne semble pas parfaitement adaptée au cours d'eau du Moulinet. Sur le Coët-Dan, la mesure maximale a été rarement dépassée. La gamme de mesure est donc plus adaptée au suivi haute fréquence de la concentration en MES.

Filtrage des données MES / Turbidité

Pour optimiser la fiabilité du jeu de données utilisé pour établir la relation Concentration des MES / Turbidité, les couples de valeurs de ces deux paramètres ont été filtrés à partir de trois critères (**Tableau 7**) ce qui a abouti à la sélection de 753 couples de valeurs pour le Moulinet et 610 pour le Coët-Dan.

Tableau 7. Résultats de l'application successive des filtres sur le nombre de couples de valeurs MES/Turbidité

Filtres successifs	Nombre de couples de valeurs MES / Turbidité après filtrage	
	Moulinet	Coët-Dan
Suppression des valeurs de concentration en MES < 2 mg/L qui est la limite inférieure de dosage selon la norme NF EN 872	990	836
Suppression des valeurs de turbidité non fiables	781	610
Suppression des valeurs de concentrations en MES en dehors de l'intervalle de confiance à 95%	753	610

Ensuite, la qualité de régression linéaire entre MES et Turbidité est comparée sur la base du coefficient de régression R^2 pour chaque jeu de données (**Figure 8**). Sur les deux sites, le filtre de fiabilité de la turbidité a conduit à la suppression de nombreux points sur l'ensemble de la gamme. Il a permis d'exclure les valeurs aberrantes dont une proportion importante était au-delà de 1000 FTU. Il semble que les données de turbidité sont plus fréquemment erronées pendant les périodes de crue.

D'autres valeurs de turbidité ont été exclues bien qu'elles soient situées dans la moyenne de la gamme. Ce sont principalement des valeurs corrigées sur des périodes de crue et validées comme non fiables.

L'utilisation du critère statistique de l'intervalle de confiance à 95% a permis sur le Moulinet d'éliminer quelques valeurs extrêmes résiduelles.

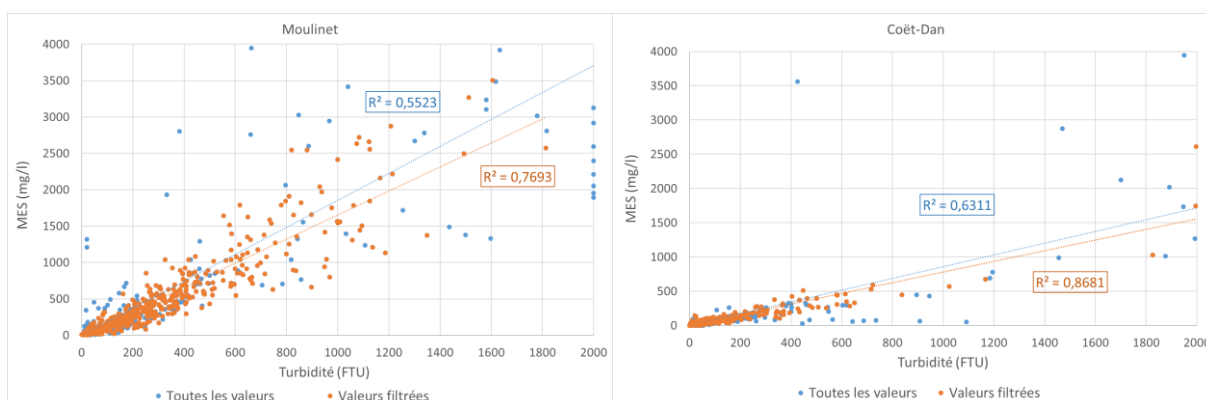


Figure 8. Comparaison du R^2 à partir d'une régression linéaire avant et après filtrage des données.

L'échantillonnage est mieux réparti sur l'ensemble de la gamme sur le Moulinet que sur le Coët-Dan. Cependant il y a globalement moins d'échantillons avec des fortes turbidités, du fait que ces valeurs soient liées à des événements hydrologiques courts et peu fréquents. Pour le Coët-Dan, il y a beaucoup d'échantillons avec une turbidité comprise entre 0 et 10 FTU dont une grande partie a été exclue car correspondant à des valeurs de concentration en MES inférieures à 2 mg/L.

Construction de la relation MES / Turbidité

Au vu des relations de corrélation entre la turbidité et les concentrations en MES, il apparaît qu'une relation linéaire simple soit satisfaisante dans le cas de ces deux petits bassins versants (Birgand et al., 2004 ; Lefrancois et al., 2007 ; Vongvixay, 2012), bien qu'en théorie cette relation varie avec la granulométrie des particules, variable en fonction des conditions hydrologiques. Trois types de relations linéaires ont été testés : une simple régression linéaire sur les couples de valeurs sélectionnés, une régression linéaire à double pente et une régression linéaire en prenant une moyenne par classe. Dans la distribution originale des couples de valeurs MES/turbidité, les valeurs faibles sont beaucoup plus nombreuses que les valeurs fortes. Ainsi la régression à double pente vise à affiner la relation en distinguant une régression pour les valeurs fortes associées à quelques événements majeurs, de granulométrie plus grossière, et une autre régression pour les gammes plus faibles et plus courantes, de granulométrie plus fine. L'utilisation de classes de valeurs moyennes vise aussi à rééquilibrer la distribution de l'échantillonnage : en prenant une valeur moyenne par classe pour estimer la régression on donne autant de poids aux valeurs faibles qu'aux valeurs fortes. Chaque régression a été forcée pour passer par l'origine. Ensuite des critères statistiques notamment ont conduit à sélectionner pour le Moulinet la relation linéaire à double pente avec un seuil fixé à 300 FTU et pour le Coët-Dan, la relation linéaire simple (**Figure 9**).

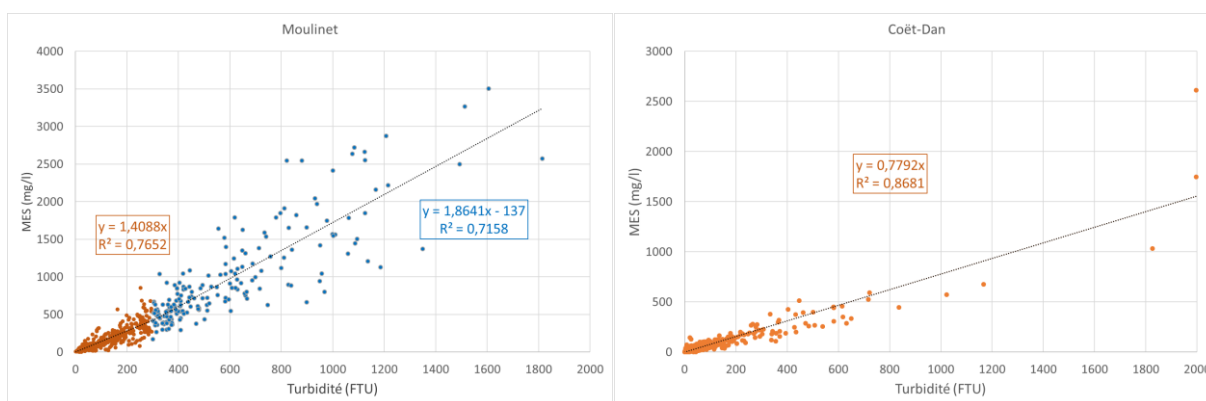


Figure 9. Relations MES / Turbidité.

On obtient des corrélations différentes pour chacun des cours d'eau, ce qui s'explique par les natures différentes des matières en suspension (couleur, taille granulométrique). En effet, les deux bassins versants correspondants sont différents en terme de géologie, topographie, contexte agricole, présence de ripisylve.

Limite de la méthode

En plus d'être étroitement liée au point de mesure, la relation obtenue est fortement influencée par le type de turbidimètre. Malgré un étalonnage et un ajustage à la formazine de deux capteurs dont le principe de mesure diffère, leurs réponses sont différentes pour un même échantillon concentré en particules (**Figure 10**). La relation MES / turbidité sera donc identique avec des appareils de mesure de même technologie uniquement. Dans le cas d'un changement de type de turbidimètre, ce qui peut être le cas pour les suivis longs termes, il faut effectuer de nouveaux points de contrôle.

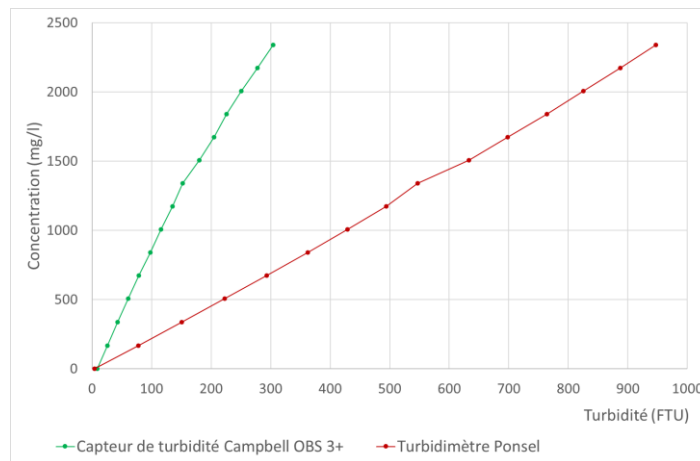


Figure 10. Turbidité mesurée par deux capteurs différents en fonction de la concentration de silice de granulométrie comprise entre 5 et 50 μm (mémoire de stage Nguyen, 2011).

Conclusion

Une méthode de mesure de la concentration en matières en suspension a été testée dans deux petits cours d'eau. Elle consiste à corréler des valeurs de turbidité mesurées par un turbidimètre à des concentrations en MES. Une fois cette corrélation établie, les flux de matières en suspension peuvent être calculés en multipliant la concentration en MES déduite de la relation MES/Turbidité par le débit instantané.

Quelques précautions importantes s'imposent pour que cette méthode soit valide. Il faut d'abord que la mesure de la turbidité soit fiable pendant toute la période de mesure, ce qui nécessite un nettoyage fréquent des capteurs ainsi qu'un étalonnage régulier à la formazine. Ce sont surtout les très fortes valeurs de turbidité qui influent sur les flux cumulés. Il faut donc s'assurer du bon déroulement de la chaîne des mesures pour ces fortes valeurs, notamment lors de l'établissement de la corrélation Concentration des MES / turbidité ; à défaut, de fortes incertitudes peuvent peser sur les bilans.

Notre méthode pour la mesure de la concentration en matières en suspension est actuellement appliquée sur des cours d'eau plus importants pour comparer différents contextes d'application.

Références bibliographiques

Birgand F, Lefrançois J, Grimaldi C, Novince E, Gilliet N, Gascuel-Oudou C (2004) Mesure des flux et échantillonnage des matières en suspension sur de petits cours d'eau. *Revue Ingénieries - EAT* n°40, 21-35.

Dupas R, Gascuel-Oudou C, Gilliet N, Grimaldi C, Gruau G (2015a) Distinct export dynamics for dissolved and particulate phosphorus reveal independent transport mechanisms in an arable headwater catchment. *Hydrol Process* **29** : 3162-3178. doi: [10.1002/hyp.10432](https://doi.org/10.1002/hyp.10432).

Dupas R, Tavenard R, Fovet O, Gilliet N, Grimaldi C, Gascuel-Oudou C (2015b) Identifying seasonal patterns of phosphorus storm dynamics with dynamic time warping. *Water Resour Res* **51** : 8868–8882, doi:[10.1002/2015WR017338](https://doi.org/10.1002/2015WR017338).

Kronvang B, Laubel A, Larsen SE, Friberg N (2003). Pesticides and heavy metals in Danish streambed sediment. *Hydrobiologia* **494** : 93-101. DOI: 10.1023/a:1025441610434

Lefrançois J (2007a) Dynamiques et origines des matières en suspension sur des petits bassins versants agricoles sur schiste. Thèse de doctorat Sciences de la Terre Rennes 1 (261 p.)

Lefrançois J, Grimaldi C, Gascuel-Oudou C, Gilliet N (2007b), Suspended sediment and discharge relationships to identify bank degradation as a main sediment source on small agricultural catchments. *Hydrol Process* **21** : 2923-2933. doi:10.1002/hyp.6509

Scheurer K, Alewell C, Banninger D, Burkhardt-Holm P (2009) Climate and land-use changes affecting river sediment and brown trout in alpine countries-a review. *Environ Sci Pollut Res* **16**: 232-242. DOI: 10.1007/s11356-008-0075-3

Versini P-A, Joannis C, Chebbo G (2015) Guide technique sur le mesurage de la turbidité dans les réseaux d'assainissement - Onema, LEESU et IFSTTAR/LEE -

Viers J, Dupre B, Gaillardet J (2009) Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database. *Sci Total Environ* **407** : 853-868. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.09.053

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 l'INSA de Rennes (206 p.).