

Mesure des flux et échantillonnage des matières en suspension sur de petits cours d'eau

François Birgand^a, Julie Lefrançois^c, Catherine Grimaldi^c, Émilie Novince^b,
Nicolas Gilliet^c et Chantal Gascuel-Odoux^e

Les matières en suspension dans les petits cours d'eau portent souvent atteinte à la qualité des milieux aquatiques et leur évaluation nécessite des méthodes spécifiques, différentes de celles qui sont souvent pratiquées pour les fleuves. Dans cet article, les auteurs proposent deux techniques complémentaires de mesures par turbidimétrie et collecteurs d'échantillonnage. Après une analyse des conditions expérimentales de leur mise en œuvre, ils commentent et discutent leurs résultats dans la perspective d'une meilleure connaissance des variabilités spatiales et temporelles des apports et des transferts des matières en suspension.

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, colmatage des habitats et des frayères de la faune benthique entraînant des conditions d'anoxie (Massa, 2000). Les MES participent à la modification de la composition chimique du milieu aquatique, en véhiculant de nombreux éléments potentiellement polluants tels les métaux et certains composés organiques (Foster and Charlesworth, 1996).

Ces constats incitent à mieux évaluer les transferts de MES. Ceux-ci ont surtout été étudiés sur de grands fleuves tels que la Seine (Meybeck *et al.*, 1998) ou l'Amazone (Guyot *et al.*, 1999) afin d'établir des bilans géochimiques. Peu de travaux ont abordé les petits cours d'eau (Walling et Amos, 1999 ; Steegens *et al.*, 2000). Ceux-ci présentent des caractéristiques spécifiques. Ils sont en tête de bassin versant, lieux de reproduction et de vie de certains poissons. Ils sont proches des sources d'érosion et peuvent présenter de fortes concentrations en MES. On y observe de fortes variations spatiales de la quantité et de la nature des MES, d'un cours d'eau à l'autre ou le long d'un même cours d'eau, en fonction de la morphologie du lit, des berges et des occupations du sol (Russell *et al.*, 2000). Ces variations spatiales sont particulièrement importantes dans les zones d'agriculture intensive, où elles sont liées

à certaines pratiques : sols nus après maïs, accès du bétail au cours d'eau, etc. Les variations temporelles des concentrations en MES sont liées aux conditions hydrologiques : averses, état hydrique du bassin versant, etc. Le calendrier agricole est aussi responsable de variations temporelles qui s'ajoutent à celles liées au cycle hydrologique.

Les mesures de flux, de concentrations des MES, leur caractérisation physicochimique se limitent en général à quelques points situés aux exutoires des bassins versants, négligeant la variabilité et la redistribution interne. Dans le meilleur des cas, ces mesures sont réalisées par des préleveurs automatiques, coûteux tant en acquisition qu'en maintenance, et donc difficilement multipliables. Bien souvent, les mesures de MES sont obtenues par prélèvements manuels avec une fréquence encore plus faible. L'échantillonnage manuel ou automatique des MES est donc le plus souvent discutable en terme de représentativité quantitative et qualitative. D'autres techniques sont présentées ici. La première technique est l'utilisation de la turbidimétrie appliquée en continu à partir de laquelle on calcule les concentrations en MES qui, associées à des mesures de débit, permettent d'évaluer les flux sur différentes échelles de temps. La seconde technique est l'utilisation d'un collecteur destiné à échantillonner les MES sur plusieurs jours, facile à installer et à relever, qui permet d'évaluer les variations spatiales des flux de MES le long du cours d'eau et d'analyser

Les contacts

^a Cemagref, UR Hydrosystèmes et bioprocédés, Parc de Tourvoie, BP 44, 92163 Antony Cedex

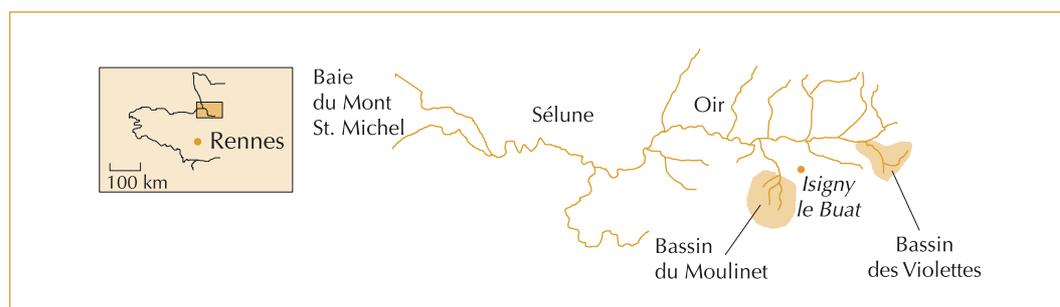
^b Cemagref, UR Gestion environnementale et traitement biologique des déchets,

17, avenue de Cucillé, CS 64427, 35044 Rennes Cedex

^c INRA UMR

Sol Agronomie Spatialisation de Rennes-Quimper, 65, route de Saint-Brieuc, 35042 Rennes Cedex

► Figure 1 – Localisation des cours d'eau du Moulinet et des Violettes sur le bassin versant de la Sélune.



leurs caractéristiques physicochimiques. Ces techniques sont testées et discutées à partir de mesures réalisées sur deux petits cours d'eau, afin de contribuer à une réflexion méthodologique sur la mesure des MES.

Matériel et Méthode

Les deux petits cours d'eau étudiés, le Moulinet et les Violettes, sont affluents de l'Oir, lui-même affluent de la Sélune qui se jette dans la baie du Mont Saint-Michel, contribuant de manière importante aux apports de sédiments (Basse-Normandie, France) (48°N, 1°O) (figure 1). Leur régime hydrologique est de type pluvial, avec un étiage marqué de juillet à septembre (tableau 1). Les bassins versants correspondants (4,53 km² pour le Moulinet et 2,24 km² pour les Violettes) sont sur schistes briovériens (Langevin *et al.*, 1984), recouverts de limons éoliens dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à quelques mètres. Les sols sont limoneux à limono-argileux très battants (Berville, 2002).

Un débitmètre et un turbidimètre ont été installés aux exutoires des deux bassins versants. Les débits sont calculés à partir des mesures, par le

débitmètre, de la vitesse de l'eau estimée par effet Doppler et de la hauteur d'eau à partir de laquelle est calculée la surface de la section mouillée. Le débitmètre Starflow (Unidata Australia) mesure aussi la température de l'eau. Il a été placé dans une section en bois calibrée qui canalise l'eau de façon à ce que l'écoulement soit le plus uniforme possible (Birgand *et al.*, soumis). Le turbidimètre est de type APC-TU (Ponselle). La mesure est obtenue par transmission et atténuation dans l'eau d'un signal lumineux à un système optique placé derrière un verre régulièrement nettoyé par un racloir automatique. Les mesures de turbidité sont exprimées en FTU (*Formazine Turbidity Unit*). Le turbidimètre a été étalonné au laboratoire en utilisant des solutions de formazine (NF EN ISO 7027). Cet étalonnage a été suivi d'une corrélation sur le terrain entre les valeurs de turbidité et les valeurs de MES correspondantes. Cette corrélation a été effectuée à partir d'échantillons prélevés lors de quelques crues et a ensuite été validée avec des prélèvements bimensuels sur une année aux exutoires des deux bassins versants. Les mesures des débitmètres et des turbidimètres sont acquises au pas de 30 secondes et moyennées toutes les 10 minutes.

| | <i>Le Moulinet</i> | <i>Les Violettes</i> |
|------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Aire drainée | 4,53 km ² | 2,25 km ² |
| Longueur | 4,9 km | 3,3 km |
| Pente | 1,6 % | 2,6 % en amont - 1,6 % en aval |
| Largeur à l'exutoire | 1,5 m | 1 m |
| Débit minimal étiage estival | 10 l/s | 2,5 l/s |
| Débit maximal crue hivernale | 570 l/s | 260 l/s |

▲ Tableau 1 – Caractéristiques des cours d'eau du Moulinet et des Violettes et des bassins versants correspondants.

Des collecteurs de MES ont également été placés aux exutoires des deux bassins versants. Un collecteur est constitué d'un tube en PVC au bout duquel est placé un filtre en tissu à maille calibrée. Ce collecteur est fixé par des attaches amovibles à des piquets plantés de façon permanente dans le fond du cours d'eau (figure 2). Il est positionné à quelques centimètres du fond du cours d'eau, de l'ordre de 5 à 10 cm, et est totalement immergé dans un secteur d'écoulement régulier, de largeur et de hauteur d'eau suffisantes. Il est relevé tous les 15 jours, échangé avec un autre collecteur sur le terrain et placé au laboratoire pendant une semaine sur un banc à filtration. L'eau s'écoule par gravité à travers un filtre de 100 μm . La masse sèche est estimée après passage à l'étuve à 40 °C pendant une semaine. Les pertes en particules solides, liées à cette filtration, ont été évaluées en filtrant le percolat ainsi obtenu à travers un filtre de 0,45 μm . Sur 10 répétitions, la filtration au laboratoire à 100 μm , comparée à une filtration à 0,45 μm , engendre une perte de MES de 1,1 % en moyenne ($\sigma = 1,3$) du filtrat. La masse sèche est rapportée à une section unitaire et à la journée, en tenant compte respectivement de la section du collecteur et du nombre de jours de pose sur le terrain. Les quantités de MES récupérées par les collecteurs sont donc exprimées en flux moyen journalier par unité de surface (en $\text{g cm}^{-2} \text{j}^{-1}$).

Différents éléments du collecteur, notamment le diamètre du tube en PVC et la maille du filtre, ont été testés sur une période de quelques mois. L'influence du diamètre a été testée par l'installation côte à côte, de deux tubes de 54 et de 90 mm de diamètre. En effet, lorsque la hauteur d'eau dans le ruisseau est faible, des tubes de petit diamètre peuvent être utilisés préférentiellement aux tubes

de plus grand diamètre. L'influence de la maille a été testée en comparant des collecteurs munis d'un filtre de 1 μm et de 100 μm . Par ailleurs, un prototype de collecteur décrit dans la littérature (Russell *et al.*, 2000) a été réalisé et utilisé comme référence. Ce collecteur est un collecteur sans filtre, permettant l'installation d'un flux d'eau à l'intérieur d'un tube PVC, comprenant en amont, un embout en forme d'entonnoir d'une ouverture de 4 mm, et en aval, un bouchon percé d'une ouverture de 4 mm. Ce prototype permet une sédimentation des MES dans le tube du fait d'un ralentissement important de l'eau qui le traverse (figure 2). Enfin, la dynamique de remplissage d'un collecteur de 54 mm de diamètre a été évaluée après des durées croissantes de pose allant de 1 h à 15 jours.

Les débitmètres, les turbidimètres et les collecteurs de 90 mm de diamètre ont été placés sur les deux cours d'eau de janvier 2002 à juin 2003, et les données associées relevées tous les 15 jours. Les tests comparatifs sur les différents collecteurs n'ont été mis en œuvre que de janvier à juin 2003.

Résultats

Débitmètre

Les détails de l'analyse sur la méthode de mesure des débits sont publiés ailleurs (Birgand *et al.*, soumis) et ne seront pas repris dans cet article car non spécifiques à la mesure des flux de MES. Néanmoins, l'utilisation des débitmètres ultrasoniques à effet Doppler dans une section calibrée a été jugée très satisfaisante tant pour sa simplicité de mise en œuvre, que pour son faible coût et la qualité des résultats obtenus (Birgand *et al.*, soumis).

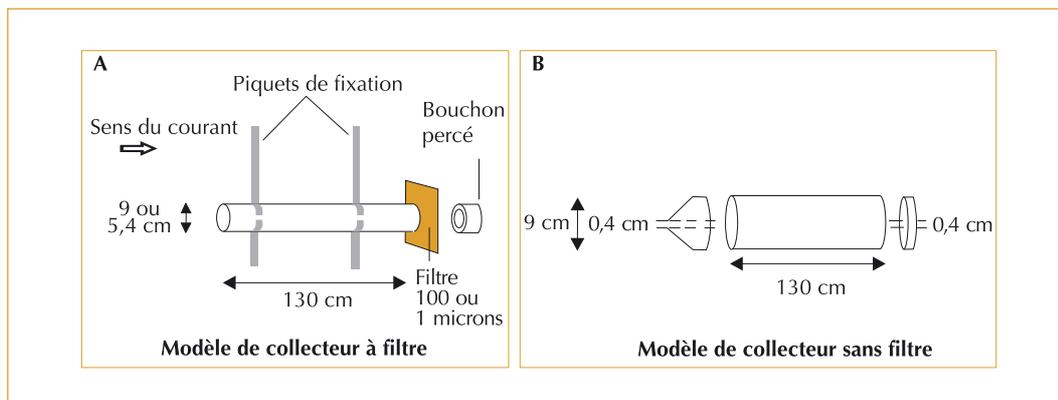
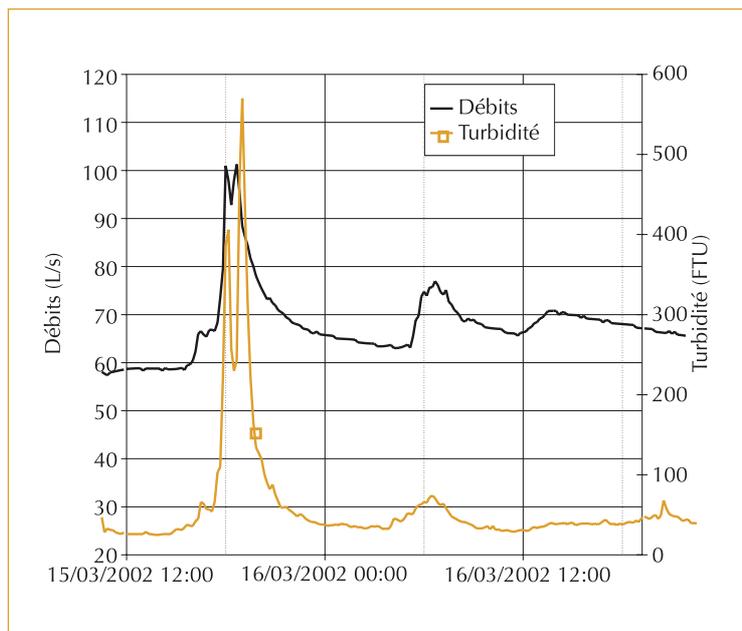


Figure 2 – Schéma de deux collecteurs de MES : (A) collecteur utilisé ; (B) collecteur construit d'après Russell *et al.* (2000).



▲ Figure 3 – Variation de la turbidité sur quelques jours sur le cours d'eau du Moulinet.

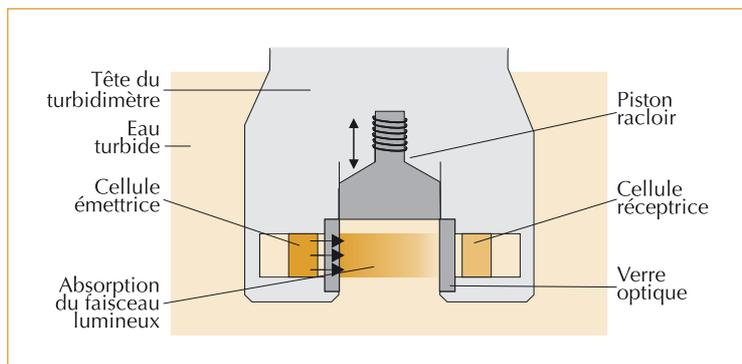
Turbidimètre

La turbidimétrie est une technique *a priori* très séduisante car elle permet de mesurer la très grande variabilité de la turbidité de l'eau, et donc potentiellement des concentrations en MES lors d'événement pluvieux (figure 3).

Cette variabilité ne pourrait être prise en compte par un échantillonnage d'eau suivi d'analyses au laboratoire. De très grandes erreurs sur la mesure des flux en résulteraient nécessairement.

Néanmoins, le gain de précision obtenu par l'utilisation d'un turbidimètre reste intégralement lié aux limites inhérentes à l'appareil lui-même, et à la corrélation obtenue entre les valeurs de turbidité et celles de MES.

▼ Figure 4 – Représentation schématique de la tête des turbidimètres utilisés plongée dans l'eau.



CORRECTIONS APPORTÉES À CAUSE DES DISFONCTIONNEMENTS DES RACLOIRS

Les appareils utilisés ici fonctionnent sur la mesure de l'atténuation d'une lumière incidente, à travers un liquide dont on mesure la turbidité (NF EN ISO 7027). Ces appareils fonctionnent avec des optiques qui sont en contact avec l'eau et avec toutes les matières biologiques et minérales en suspension (figure 4). Les optiques sont sujettes à des variations du signal dues à l'altération des verres, indépendantes des variations de turbidité. Le dépôt de particules ou de biofilms sur les verres augmente artificiellement l'absorption de lumière et par conséquent les valeurs de turbidité enregistrées.

Ces dépôts sont théoriquement limités ou empêchés par des racloirs qui nettoient de façon régulière et automatique les optiques au moyen d'un piston (figure 4). La fréquence de raclage peut être définie par l'utilisateur et a, dans notre cas, été fixée à 15 minutes pour des raisons de consommation électrique. Un nettoyage manuel a été également réalisé environ tous les 15 jours, à chaque relevé des données.

Malgré le nettoyage automatique des optiques, nous avons observé une augmentation lente de la ligne de base des valeurs de turbidité, d'un nettoyage manuel à l'autre des verres. Cette dérive est attribuée à un encrassement des optiques, et ce, malgré le raclage automatique (figure 5). À cette dérive s'est ajoutée une dérive beaucoup plus lente sur plusieurs mois, démontrant un nettoyage bimensuel imparfait.

Pour des concentrations en MES de base (5-20 mg L⁻¹) équivalentes en début et fin de campagne de mesure, les valeurs de turbidité sont passées de 10-20 FTU à plus de 100 FTU. Cette dérive lente du signal pourrait être due à un encrassement chronique difficile à nettoyer manuellement, à un fumage progressif des optiques ou encore à une évolution des circuits électroniques des appareils.

Les données brutes des turbidimètres ont donc fait l'objet de deux corrections successives. Pour les deux corrections, on a fait l'hypothèse que les valeurs de base des turbidités devaient être relativement constantes et on a soustrait à chaque valeur de turbidité la valeur de dérive estimée.

La dérive bimensuelle a été estimée par l'écart de la ligne de base mesurée par rapport à une ligne de base constante entre deux nettoyages consécutifs. Pour la dérive à plus long terme, il a été nécessaire d'ajuster toutes les valeurs de la ligne de base sur toute la campagne de mesure, aux valeurs de base mesurées pendant la période de corrélation (figure 5). Ces deux corrections sont très importantes dans le calcul des flux.

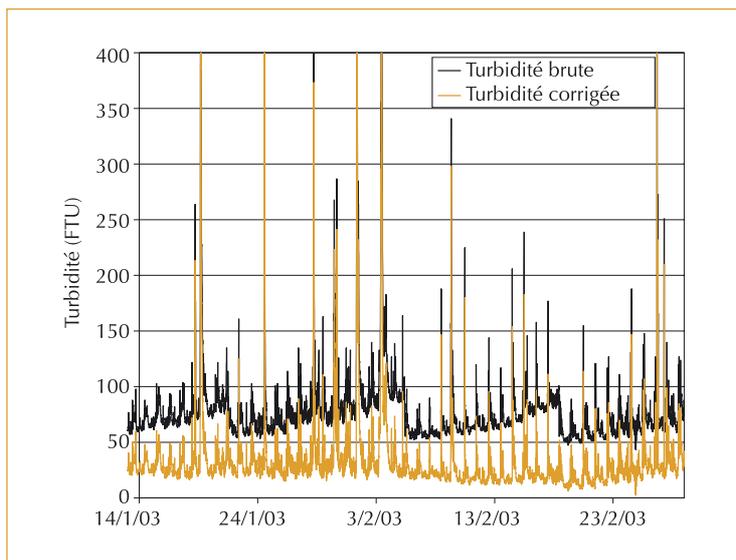
Des variations diurnes des valeurs de turbidité ont été constatées sur les deux appareils (figure 6). Il aurait été intéressant de mesurer si ces variations du signal enregistré correspondaient bien à des variations réelles des concentrations en MES. Pour des raisons de temps, ceci n'a pas été fait. La bonne cyclicité des données fait tout d'abord penser à des artefacts des capteurs en liaison avec les variations de température de l'eau.

Cette hypothèse a dû être écartée car les maxima et les minima observés à heure relativement fixe à chaque exutoire, sont décalés de plusieurs heures dans le temps d'un bassin versant à l'autre, alors que les variations de température de l'eau sont synchrones.

Pour les mêmes raisons (décalage de temps entre bassins), ces observations ne peuvent être imputées à des croissances de biofilms plus importantes pendant la période diurne, ni à une interférence avec la lumière du jour. Ces variations cycliques des valeurs de turbidité ont un effet très important sur le bilan annuel des flux de MES pour les deux bassins, puisque les valeurs de turbidité sont parfois multipliées par 2 entre le minimum et le maximum (figure 6).

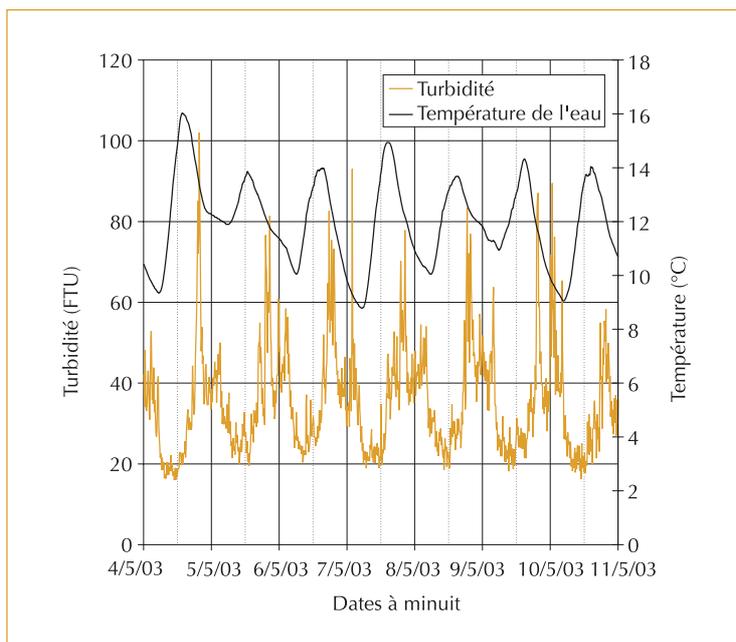
CORRÉLATION ENTRE LES VALEURS DE TURBIDITÉ ET LES CONCENTRATIONS EN MES

L'utilisation d'un turbidimètre repose sur l'hypothèse d'une relation relativement stable dans le temps entre les valeurs de turbidité et les concentrations en MES. Pour établir cette relation, une corrélation entre les valeurs de turbidité et les concentrations en MES est nécessaire sur chaque bassin, car la granulométrie des MES influence les valeurs de turbidité mesurées (NF EN ISO 7027). Cette granulométrie peut être très différente des solutions de formazine avec lesquelles les appareils sont préalablement étalonnés. La corrélation est d'autant meilleure



que les valeurs de turbidités pour laquelle elle est effectuée couvrent toute la gamme des valeurs mesurées pendant la campagne de mesure. Des échantillonneurs automatiques ont été installés et programmés pour prélever de l'eau lors des crues, périodes où sont mesurées les plus fortes valeurs de turbidité. Les concentrations en MES mesurées dans les échantillons ont été

▲ Figure 5 – Valeurs de turbidités brutes et corrigées, après prise en compte de la dérive à court et long terme.



▲ Figure 6 – Variations diurnes des températures de l'eau et des valeurs de turbidité à l'exutoire du cours d'eau du Moulinet.

comparées aux valeurs de turbidité enregistrées au même moment. Deux corrélations différentes ont été obtenues pour chaque exutoire (figure 7). La relation est linéaire jusqu'à environ 100 FTU. À partir de cette valeur, la relation entre la masse de MES et l'absorption de lumière n'est plus linéaire, car certaines particules peuvent se trouver dans l'ombre d'autres particules par rapport à la source de lumière du turbidimètre.

La corrélation a été réalisée avec 125 échantillons prélevés pendant 5 crues distinctes pour le ruisseau du Moulinet, 147 échantillons correspondant à 6 crues pour le ruisseau des Violettes (figure 7). Des relations polynomiales d'ordre 2 ont été obtenues (r^2 de 0,995 et de 0,942 pour le Moulinet et les Violettes, respectivement). Ces relations n'ont été établies que pour des valeurs de turbidité inférieures à 1554 FTU et 503 FTU pour le Moulinet et les Violettes, respectivement, valeurs correspondant aux échantillons les plus chargés en MES lors des crues échantillonnées (figure 7). Pour des valeurs supérieures, les corrélations ont été extrapolées en prolongeant les courbes existantes par des relations linéaires entre les turbidités et les concentrations en MES. Cette méthode, qui a tendance à sous-estimer les valeurs de MES, a paru être la moins mauvaise.

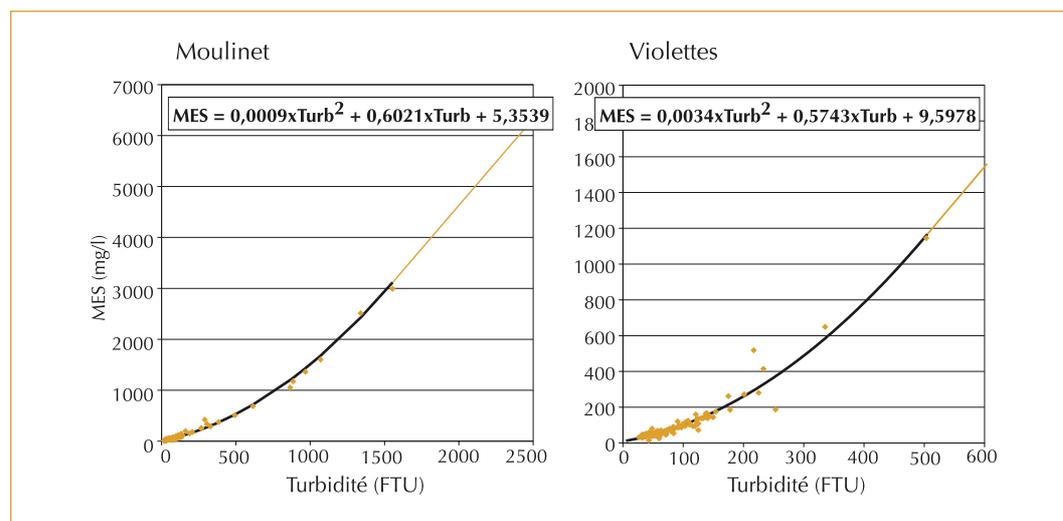
La chaîne de traitement des données brutes du turbidimètre, depuis la correction des dérives jusqu'aux concentrations de MES estimées à partir des corrélations, a été validée sur 30 et 28 points pour le Moulinet et les Violettes respectivement, correspondant à des prélèvements manuels répartis tout au long de l'année. La corrélation

entre les concentrations de MES mesurées directement et celles estimées à partir de cette chaîne de traitements des données des turbidimètres donne des résultats satisfaisants, même si la plupart des points correspondent à de faibles concentrations en MES. La corrélation semble meilleure pour les Violettes que pour le Moulinet (figure 8). La courbe de régression linéaire est en fait déviée de la bissectrice principalement à cause des trois points de fortes concentrations. Pour ces fortes valeurs, il est difficile de valider la corrélation : ces points correspondent à des prélèvements en crue, or les concentrations peuvent varier fortement en quelques minutes.

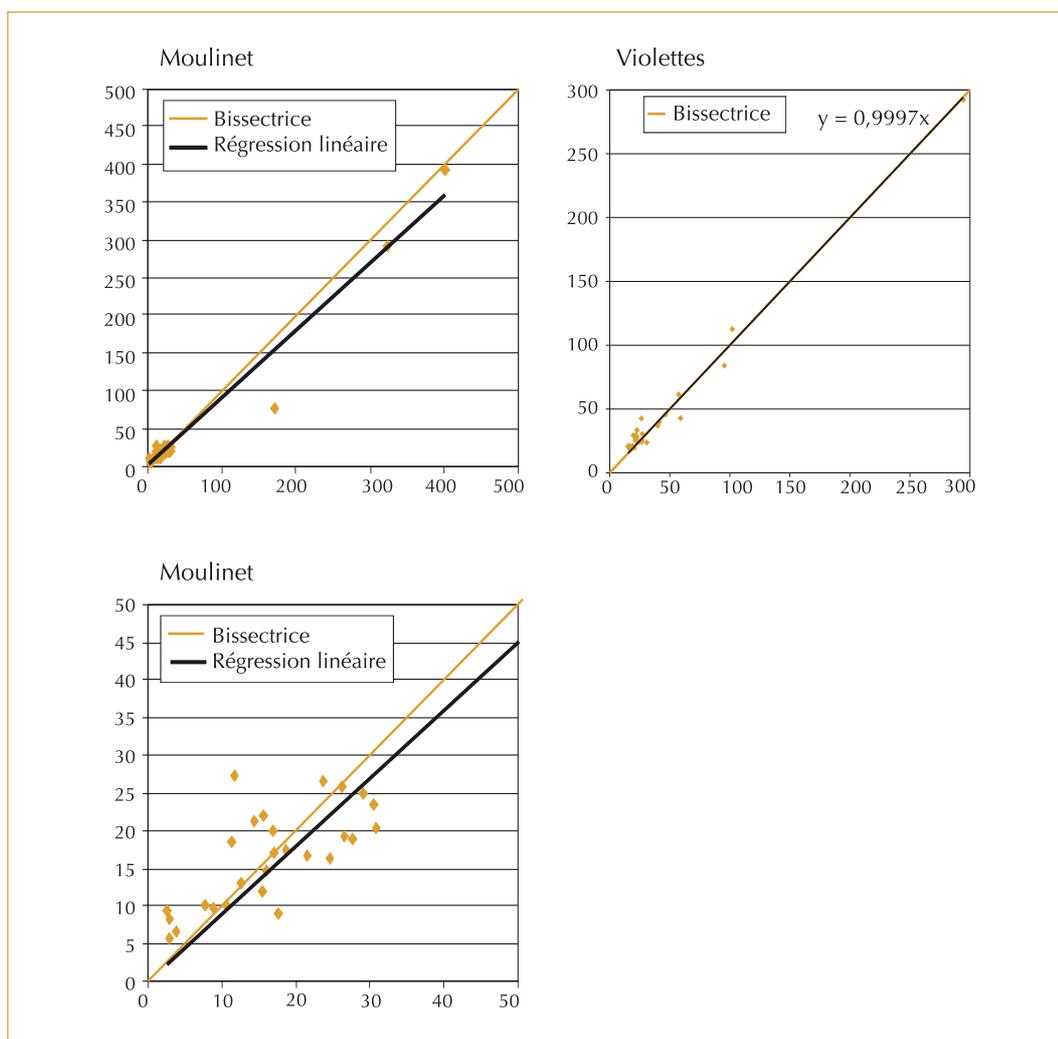
Il faut donc une synchronisation parfaite des horloges des turbidimètres et de la montre de la personne qui prélève, ce qui n'est pas si évident dans la pratique. En outre, les valeurs enregistrées par le turbidimètre correspondent à la moyenne de 20 mesures instantanées relevées toutes les trente secondes, alors qu'un prélèvement correspond à la dernière mesure instantanée. Les résultats pour les fortes concentrations, peu nombreux alors même qu'ils sont susceptibles de varier fortement selon les crues, sont donc à prendre avec précaution.

LES FLUX DE MES À DIFFÉRENTES ÉCHELLES DE TEMPS SUR LES DEUX COURS D'EAU

Les mesures en continu de turbidité associées à des mesures en continu des débits permettent de calculer les flux de MES à différentes échelles temporelles : bilan annuel, variations saisonnières, ratios en crue et hors crue et ses variations



► Figure 7 – Corrélation entre turbidité et MES sur les cours d'eau du Moulinet et des Violettes.



◀ Figure 8 – Corrélation entre les concentrations (mg/L) de MES mesurées manuellement (ordonnées) et estimées par la chaîne de mesure liée au turbidimètre (abscisses) sur les cours d'eau du Moulinet et des Violettes.

saisonniers, dynamique au cours de la crue et ses variations selon la place de la crue dans le cycle hydrologique. Les flux sur une année (de juin 2002 à mai 2003), montrent que ce sont près de 116 t et 83 t de MES qui sont transportées sur respectivement le Moulinet et les Violettes, ce qui correspond à des flux spécifiques de 265 et 383 kg ha⁻¹ an⁻¹. Respectivement, 73 % et 70 % des flux sur le Moulinet et les Violettes, sont liés à la période de reprise des écoulements hivernaux (octobre à février) et représentent 68 % et 75 % des volumes d'eau écoulés sur la campagne de mesure.

En différenciant les écoulements en crues et débits de base, il apparaît que 74 % et 67 % des flux de MES pour le Moulinet et les Violettes, respectivement, ont lieu pendant les périodes de

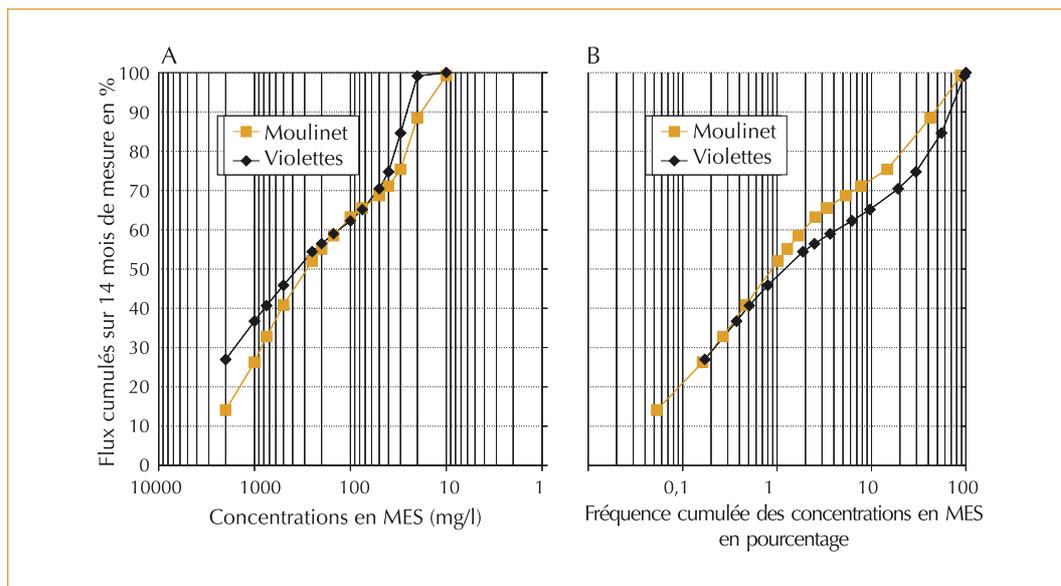
crue. Les fortes concentrations en MES (estimées supérieures à 250 mg L⁻¹) sont peu fréquentes (de 1 à 2 % du temps), mais représentent à elles seules près de 50 % du bilan des flux sur les deux bassins (figure 9, p. 28).

Collecteurs

DONNÉES MANQUANTES

Dans un certain nombre de situations, le collecteur n'a pas bien fonctionné. Il a été partiellement obturé, soit par des feuilles et des branches, soit par des matériaux charriés sur le lit du cours d'eau, notamment lorsque le collecteur était localisé trop près du fond du fait d'un niveau d'eau insuffisant. Les données manquantes correspondent surtout à l'automne (feuilles, branches...) pour le Moulinet qui comporte beaucoup d'arbres

► Figure 9 – Pourcentage du flux cumulé de MES correspondant aux périodes pour lesquelles les concentrations dépassent des concentrations seuil (A), traduit en fonction des fréquence d'occurrence (B).



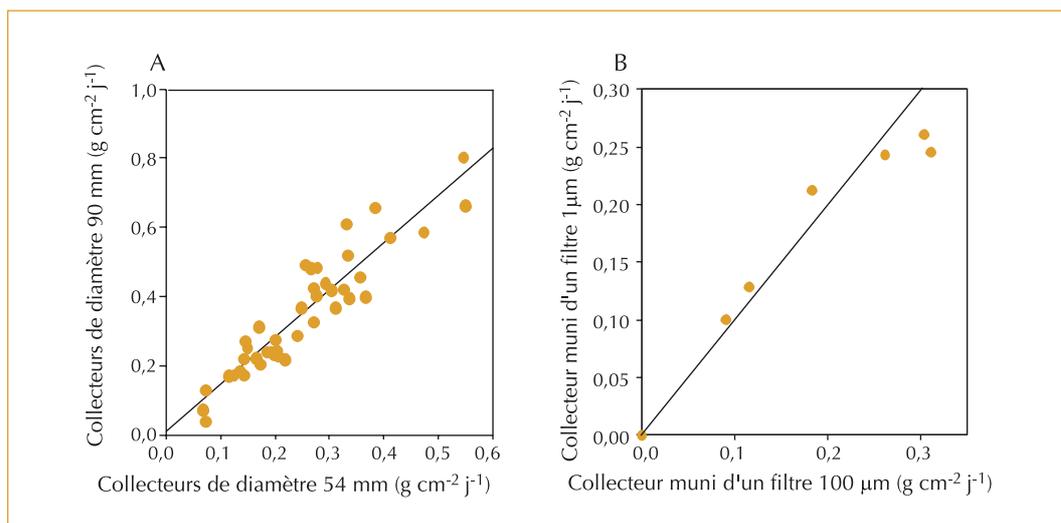
le long du cours d'eau, et à l'été pour l'amont des Violettes qui présente un étiage estival marqué. Au total, aux exutoires, 1 échantillon sur 31 pour le Moulinet, et 5 sur 26 pour les Violettes n'ont pu être utilisés.

ANALYSE DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS DU COLLECTEUR

La comparaison des collecteurs de diamètres différents montre que les quantités de MES des collecteurs de diamètre 90 mm, rapportées à l'unité de surface et au jour, sont environ 1,4 fois ($r^2 = 0,86$; $n = 46$) supérieures à celles des collecteurs de diamètre 54 mm (figure 10A).

Les filtres de 100 μm semblent retenir autant les MES que ceux de 1 μm . Les quantités de MES recueillies par des collecteurs munis d'un filtre de 100 μm ne semblent pas statistiquement différentes de celles recueillies par des collecteurs munis d'un filtre de 1 μm (intervalle de confiance 95 % ; $n = 6$) (figure 10B). Cette conclusion doit toutefois être nuancée à cause du faible nombre d'échantillons. Il semble néanmoins que le filtre de 1 μm retienne plus de MES pour les faibles charges ($< 0,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$) et que ce soit le contraire au-dessus de cette valeur. Ceci pourrait s'expliquer par les phénomènes de reflux détaillés par la suite.

► Figure 10 – Influence de la taille du diamètre du collecteur (A) et de la maille du filtre (B).



Les quantités de MES mesurées par le collecteur utilisé et celui de Russell *et al.* (2000) sont proportionnelles (figure 11). Les quantités de MES recueillies par le collecteur de Russell sont beaucoup plus faibles, avec un rapport de l'ordre de 5 000 entre les deux collecteurs ($r^2 = 0,95$; $n = 5$). Cette relation mériterait d'être approfondie compte tenu du faible nombre de points pris en compte.

CONFRONTATION DES DONNÉES DU TURBIDIMÈTRE ET DU COLLECTEUR

À l'exutoire où sont placés un turbidimètre et un collecteur de 90 mm de diamètre, les flux obtenus à partir du turbidimètre ont été sommés sur la période de pose du collecteur puis exprimés en flux moyens journaliers (g j^{-1}). Les flux mesurés par le collecteur pendant la même période, exprimés en flux moyens journaliers par unité de surface ($\text{g cm}^{-2} \text{j}^{-1}$) ont été multipliés par la section de chaque cours d'eau pour obtenir des flux moyens journaliers (g j^{-1}).

Les quantités de MES recueillies dans les collecteurs ont été corrélées aux flux cumulés sur la même période. Toutes données confondues, le ratio moyen est de 670 ($\sigma = 540$, $n = 30$) pour le Moulinet et de 3 480 ($\sigma = 2 300$, $n = 21$) pour les Violettes (figure 12). Le ratio est donc très différent pour chacun des deux cours d'eau. Une relation logarithmique peut être statistiquement établie pour chacun d'eux. On distingue en fait deux ensembles de points. Dans un premier

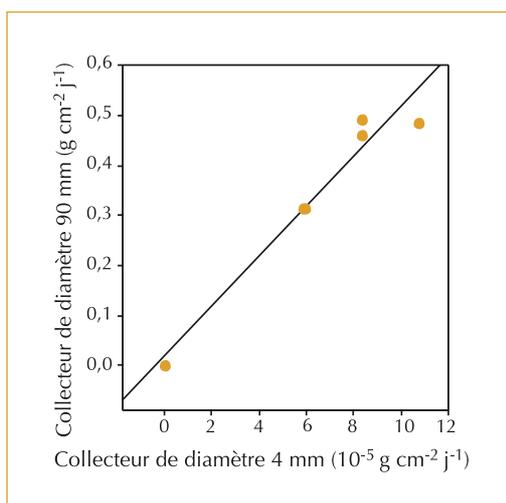


Figure 11 – Flux de MES mesurés par le collecteur utilisé ici et le collecteur de Russell *et al.* (2000).

ensemble, les quantités recueillies par le collecteur sont très liées à celles mesurées par le turbidimètre. Dans un second ensemble de points très dispersés, on observe un palier correspondant aux valeurs de flux les plus importantes (500 kg j^{-1} et 400 kg j^{-1} respectivement pour le Moulinet et les Violettes), donc aux débits les plus importants ($> 100 \text{ L s}^{-1}$ pour le Moulinet et $> 50 \text{ L s}^{-1}$ pour les Violettes). Les quantités de MES mesurées par les collecteurs semblent donc liées à celles mesurées par les turbidimètres dans les périodes sans crues. Pendant les crues, les collecteurs semblent sous-échantillonner les MES comparativement aux autres périodes et plus

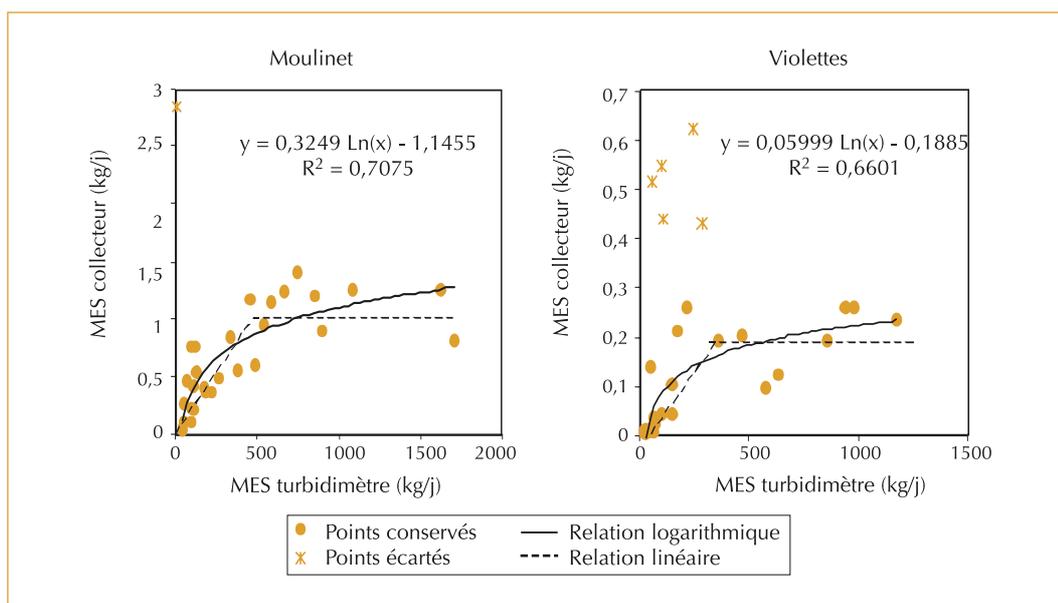
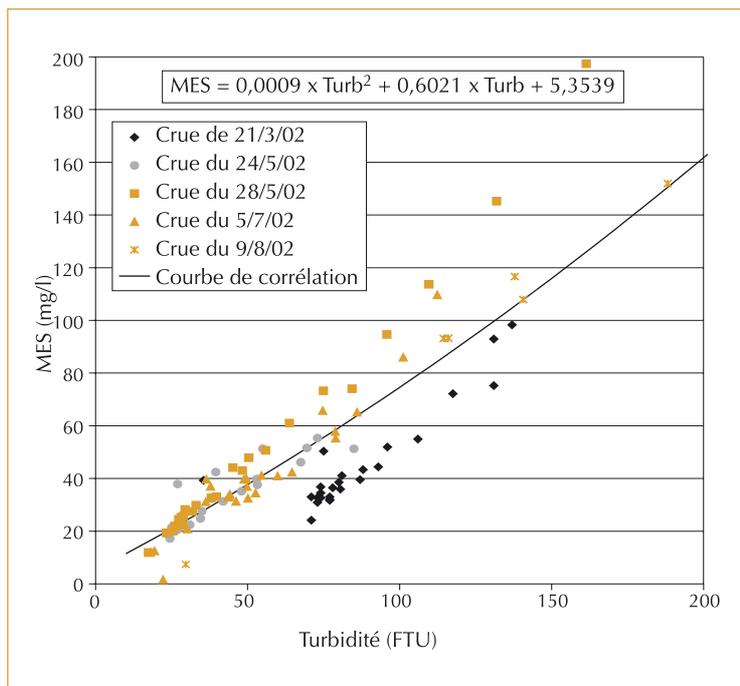


Figure 12 – Relations entre les flux moyens journaliers de MES sur quinze jours (kg j^{-1}) mesurés par le collecteur et par le turbidimètre.



▲ Figure 13 – Relations turbidité-MES pour différentes crues à la station du Moulinet et courbe de corrélation ajustée globalement à l'ensemble des données.

encore aux turbidimètres. En utilisant l'ajustement logarithmique, établi entre les deux types de données pour estimer un bilan annuel, on obtient des bilans de matières très proches de ceux établis à partir des turbidimètres (tableau 2). L'utilisation des relations linéaires, bien que moins précise, permet toutefois d'estimer les bilans de matière dans une gamme assez semblable.

Discussion

Le turbidimètre

L'estimation des flux de MES à l'exutoire des bassins versants dépend de la précision sur la mesure des débits et sur celle des concentrations en MES. L'incertitude sur la mesure des débits a été dis-

cutée par ailleurs et jugée acceptable (Birgand *et al.*, soumis). L'extrême variabilité temporelle des concentrations en MES nous a amenés à utiliser une méthode indirecte, la turbidimétrie, pour estimer ces teneurs. Plusieurs sources d'erreur pèsent sur la validité de cette estimation. La première source d'erreur est la dérive de la ligne de base des valeurs de turbidité qui nécessite une correction. Celle-ci est basée sur l'hypothèse d'une ligne de base constante pendant l'année. Ceci n'a pu être totalement vérifié. On peut cependant noter que les concentrations en MES montrent peu de variations.

Les variations diurnes cycliques des valeurs de turbidité jouent un rôle important dans l'évaluation des flux pendant les périodes d'écoulement de base. Aucune explication évidente n'a pu être trouvée pour les expliquer. D'autres paramètres mesurés en continu et sur le même site, tels que conductivité électrique, charge hydraulique de la nappe de subsurface, hauteur d'eau du ruisseau, montrent également une cyclicité diurne (Grimaldi *et al.*, 1994). S'il s'agissait d'un artefact du capteur, ce qui ne semble pas le cas, une partie de nos bilans seraient à remettre en cause pour ces périodes.

Une autre source d'erreur est associée aux relations utilisées entre les valeurs de turbidité et les concentrations en MES. Les corrélations sont assez bonnes (r^2 de 0,995 et de 0,942 pour le Moulinet et les Violettes, respectivement) mais représentent une relation globale, sur toutes les crues échantillonnées, alors que la figure 13 illustre des différences entre les crues. D'après ces données, il semble exister une certaine unicité de la relation pour une crue particulière, cette relation variant selon les crues. Néanmoins, la courbe globale de corrélation trouvée semble moyenniser ces différentes relations. On peut penser que les valeurs de MES, sous ou surestimées pour une crue, se compensent sur le long terme.

| Flux annuel | <i>Le Moulinet</i> | <i>Les Violettes</i> |
|---------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Turbidimètre | 116 t | 83 t |
| Collecteurs Relation logarithmique | 107 t | 74 t |
| Collecteurs Relations linéaires | [70-205] t | [70-155] t |

▲ Tableau 2 – Bilan des flux de MES estimés à partir des turbidimètres et des collecteurs.

Des échantillons d'eau à fortes valeurs de turbidités (> 150 FTU) ont pu être prélevés pour seulement une crue, à partir d'un nombre réduit de mesures (21 pour le ruisseau du Moulinet, 11 pour le ruisseau des Violettes). Comme souligné dans le paragraphe précédent, la relation établie pour cette seule crue n'est vraisemblablement pas valable pour d'autres crues de forte turbidité.

De plus, les corrélations ont pu être établies au cours de cette crue pour des valeurs de turbidité inférieures à 1 554 FTU et 503 FTU pour le Moulinet et les Violettes, respectivement (figure 7, p. 26). Pour des valeurs supérieures, les corrélations ont été extrapolées en prolongeant les courbes existantes par des relations linéaires. Une incertitude forte existe donc pour les valeurs de turbidité supérieures à ces valeurs seuil. Au Moulinet, les turbidités supérieures à 1 554 FTU représentent seulement 0,1 % du temps, mais environ 20 % du flux total estimé sur la période étudiée (figure 9, p. 28). Aux Violettes, les turbidités supérieures à 503 FTU représentent 0,8 % du temps et plus de 45 % du flux total estimé sur la période étudiée (figure 9). De très fortes incertitudes subsistent donc pour les fortes valeurs de turbidité et donc pour les flux totaux. La méthode d'interpolation ayant tendance à sous-estimer les concentrations en MES au-dessus des valeurs seuil de turbidité, il est vraisemblable que les flux estimés aux exutoires soient sous-estimés. La corrélation effectuée sur des échantillons

bimensuels prélevés manuellement et utilisée pour la validation (figure 8, p. 27) montre un nuage équitablement réparti de part et d'autre de la bissectrice, mais elle n'est établie qu'avec peu de fortes valeurs de concentration et de turbidité. Ceci pose le problème général de l'établissement de corrélation sur certaines gammes de valeurs, à cause de leur rareté et de leur variabilité dans cette gamme.

Les corrections sur le signal opérées *a posteriori* sont très coûteuses en temps et en énergie et demandent un bon apprentissage pratique. Ces difficultés pourraient être pour partie évitées : 1) en augmentant la fréquence des raclages, ce qui nécessite une source en énergie électrique plus grande, et en veillant de manière générale au bon fonctionnement des raclours pour éviter l'encrassement des optiques ; 2) en effectuant un étalonnage régulier, tous les quinze jours, des turbidimètres avec des solutions de formazine pour estimer directement la dérive à long terme. L'échantillonnage d'un nombre important de crues est néanmoins essentiel pour couvrir toute la gamme des valeurs de turbidité, en particulier pour obtenir une bonne estimation des teneurs en MES pour les fortes valeurs de turbidité. Cet échantillonnage est coûteux en temps.

Malgré toutes les imperfections relevées ici, cette méthode reste sans doute la moins mauvaise pour analyser la variabilité temporelle des

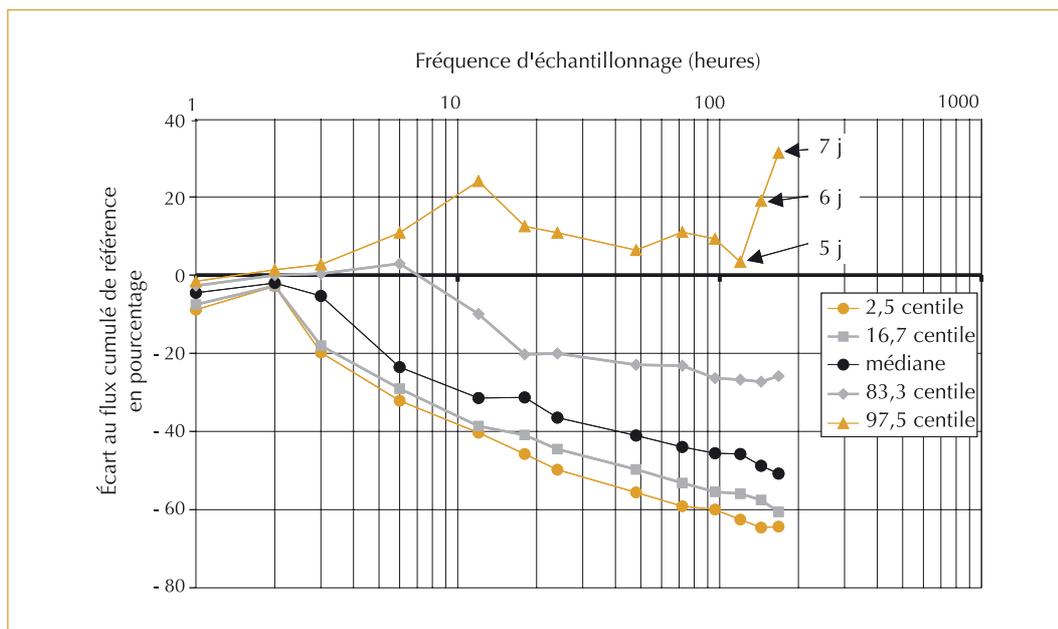


Figure 14 – Estimation de l'écart entre flux cumulé de MES mesuré et flux cumulé estimé à partir de différentes fréquences d'échantillonnage sur le cours d'eau du Moulinet. Représentations de quelques valeurs statistiques (centiles).

concentrations de MES et la prendre en compte dans le calcul des flux. En prenant le flux cumulé total estimé par cette méthode comme valeur de référence, des scénarios d'échantillonnage à pas de temps fixe ont été testés. Ces tests montrent qu'avec une concentration journalière de MES et les débits en continu comme seule information, les flux auraient 90 % de chance d'être sous-estimés et 85 % de chance d'être sous-estimés d'au moins 20 % (figure 14, p. 37). Cette simulation suggère aussi qu'il aurait fallu échantillonner au moins toutes les deux heures sur le Moulinet, pour être sûr de ne pas sous-estimer les flux totaux à moins de 10 % (figure 14). Une telle fréquence d'échantillonnage est impossible dans la pratique et on voit donc bien tout l'intérêt qu'il y a à obtenir une information à très haute fréquence, fut-ce par une méthode indirecte.

Le collecteur

Le collecteur opère une filtration de l'eau du cours d'eau pour échantillonner les MES. Cette filtration n'apparaît pas sensible à la maille du filtre. Il est probable que, d'emblée, le colmatage du filtre par les matières en suspension impose une filtration plus fine que celle imposée par le filtre utilisé. Au colmatage du filtre s'ajoute le remplissage progressif du tube par les MES. Ces dépôts induisent une vitesse de plus en plus faible de l'écoulement dans le collecteur comparativement à celle du cours d'eau, ce qui s'accompagne d'un reflux de plus en plus important.

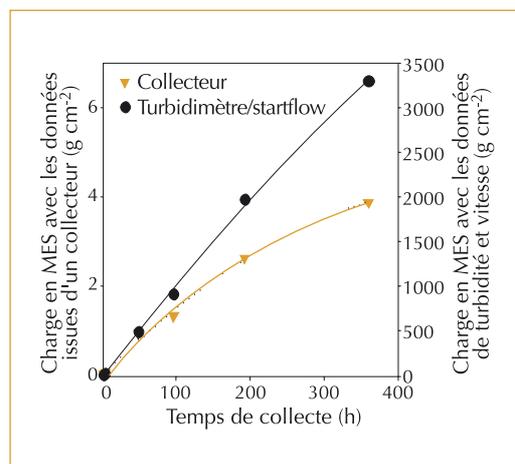
Ceci est confirmé par l'analyse du remplissage du collecteur en fonction de sa durée de pose (figure 15). Le remplissage, toujours effectif, est en effet de plus en plus faible quand la durée de

pose augmente. La durée de pose optimale du collecteur dépend de la quantité et des caractéristiques des matériaux transportés, ainsi que de l'hydrodynamique du cours d'eau. Cette durée semble de l'ordre de 4-5 jours dans les conditions de l'étude, qui sont celles d'un petit cours d'eau et d'une période hors crue. Au-delà, l'échantillon collecté n'est plus représentatif de l'ensemble de la période de pose. En période de crue, cette durée de pose optimale est plus limitée.

Ce phénomène de reflux explique que le collecteur soit un système d'échantillonnage rudimentaire et grossier des MES, mais néanmoins continu, plus qu'un réel système de leur mesure. Dès la pose, les turbulences à l'entrée du tube sont telles qu'une grande partie du flux ne pénètre pas. L'échantillonnage des MES par les collecteurs est lié au flux d'eau et de MES qui transitent par ces collecteurs. La quantité de MES estimée à partir des mesures du turbidimètre est très supérieure à celle mesurée par le collecteur de diamètre 90 mm pendant la même durée. L'échantillonnage des collecteurs de MES est beaucoup plus efficace pour le Moulinet que pour les Violettes (figure 12, p. 29). Ceci est sans doute lié à la vitesse de l'eau plus importante sur le Moulinet que sur les Violettes. Cet échantillonnage, rapporté à une section unitaire, est plus élevé avec un collecteur de diamètre 90 mm qu'avec un collecteur de 54 mm, ces phénomènes de reflux étant plus limités dans un gros collecteur. Ainsi, plusieurs facteurs contrôlent l'efficacité de l'échantillonnage, à savoir la vitesse de l'eau forçant le passage de l'eau à travers le collecteur, la concentration en MES et leur nature influençant le colmatage, le diamètre du collecteur modulant le reflux. Cette complexité empêche une correction simple liée par exemple à la durée de pose.

La quantité de MES récoltée par un collecteur de 90 mm de diamètre est de l'ordre de 5 000 fois supérieure à celle récoltée par le collecteur de Russell *et al.* (2000), une fois ces deux mesures rapportées à une section unitaire de 1 cm². Le collecteur de Russell a comme principe d'imposer une vitesse plus faible dans le collecteur que dans le cours d'eau pour favoriser la sédimentation des particules en suspension. Le principe de l'échantillonnage des MES est donc très différent. On peut de plus faire l'hypothèse que le collecteur posé à 5-10 cm du fond échantillonne pour partie des éléments transportés par saltation, en particulier lors des crues, par opposition au collecteur de Russell qui

► Figure 15 – Charge en MES d'un collecteur en fonction de la durée de pose dans le cours d'eau en période hivernale de basses eaux.



n'échantillonne que les matières en suspension proprement dites, c'est-à-dire celles circulant à la vitesse de l'eau. Cette hypothèse est confirmée par la granulométrie des échantillons collectés, ceux du collecteur présentant à l'observation des matériaux grossiers en quantité nettement plus importante que celle du collecteur de Russell (données non montrées ici).

Cette méthode de collecte des MES peut être considérée, avec les limites discutées ici, comme quantitativement et qualitativement représentative des MES qui transitent dans le ruisseau. Elle nécessite quantitativement un étalonnage et une durée de pose relativement limitée. Elle peut s'avérer un outil intéressant pour analyser les variations spatiales et temporelles des flux de MES tant le long d'un cours d'eau que d'un cours d'eau à l'autre (Lefrançois *et al.*, 2004).

Conclusion

Deux méthodes complémentaires de la mesure des flux de MES dans les petits bassins versants ont été testées.

La première méthode consiste à corrélérer des valeurs de turbidité mesurées par un turbidimètre à des concentrations en MES. Cette corrélation établie, les flux peuvent être calculés à partir des données de débits et de turbidité obtenues à pas de temps court, de l'ordre de quelques minutes.

Quelques précautions importantes s'imposent pour que cette méthode soit valide. Il faut d'abord que le signal du turbidimètre soit cohérent pendant toute la période de mesure, ce qui nécessite un nettoyage régulier des optiques qui s'encrassent facilement et un étalonnage de terrain régulier. Ce sont surtout les très fortes valeurs de turbidité qui influent sur les flux cumulés. Il faut donc s'assurer de l'établissement de la

corrélation turbidité/MES pour ces valeurs ; à défaut, de fortes incertitudes peuvent peser sur les bilans.

La deuxième méthode consiste à piéger une partie des matières en suspension par filtration dans des collecteurs placés dans la colonne d'eau des ruisseaux. La quantité de MES piégées en deux semaines a pu être corrélée aux flux estimés par la première méthode. Cette méthode permet de poser un nombre important de collecteurs dans les cours d'eau et d'obtenir ainsi une information quantitative sur les flux de MES sur plusieurs sites sans avoir à utiliser la première méthode qui nécessite de lourds moyens.

Ces collecteurs posent problème en automne où ils peuvent être obturés par des débris (feuilles...) ou lorsque le niveau d'eau est faible. Par ailleurs, s'obturant très progressivement avec les matériaux accumulés, ils doivent être utilisés sur des durées limitées si on veut échantillonner les MES de manière représentative des flux d'eau. Ils ne sont utilisables pour estimer des flux, qu'à condition de les calibrer, ce qui représente en soi une lourde démarche. Ces collecteurs étant posés à quelques centimètres du fond du cours d'eau, ils échantillonnent les matières solides de manière assez large, au-delà des seules matières en suspension.

L'association des deux instruments est intéressante. Le turbidimètre assure un suivi précis des flux de MES dans le temps et permet le calibrage des collecteurs. Les collecteurs permettent une analyse spatialisée et un échantillonnage facile des MES le long du cours d'eau. Ils peuvent contribuer à mieux évaluer les flux de MES et leurs variabilités spatiales. Les méthodologies pour réaliser des bilans de matières constituent encore un réel problème dès lors que l'on veut tendre vers une approche spatialisée et relativement précise dans le temps. □

Remerciements

Ce travail a été financé dans le cadre d'une action de recherche INRA-CEMAGREF « Aquae », dans le cadre d'un projet intitulé « Effets de la gestion des bassins versants sur les transferts particuliers et dissous et la qualité biologique des eaux de surface en zone d'élevage ».

Résumé

Deux méthodes complémentaires de la mesure des flux de MES dans les petits bassins versants ont été testées. La première méthode consiste à corréliser des valeurs de turbidité mesurées par un turbidimètre à des concentrations en MES. Cette corrélation établie, les flux sont calculés à partir des données de débit et de turbidité obtenues à pas de temps court, de l'ordre de quelques minutes, ce qui permet de prendre en compte les variations rapides des flux instantanés. La deuxième méthode consiste à piéger une partie des matières en suspension par filtration dans des collecteurs placés horizontalement dans la colonne d'eau des ruisseaux et relevés tous les quinze jours. Ces deux méthodes ont été mises en œuvre durant une année, à l'exutoire de deux petits bassins versants agricoles de Basse-Normandie, de 2,2 et 4,5 km².

Les turbidimètres nécessitent des traitements de données assez longs, du fait de variations diurnes et de divers phénomènes de dérive. La valeur de la méthode dépend de la représentativité de la corrélation turbidité/MES, particulièrement pour les fortes valeurs. Celles-ci pourtant rares (moins de 1 % du temps) ont un poids très important sur le bilan (plus de 50 % des flux estimés). Les collecteurs ont fourni des valeurs de MES qui ont pu être corrélées aux flux estimés par la première méthode. Ces collecteurs constituent une voie rudimentaire mais néanmoins efficace pour approcher les bilans de matière et échantillonner les MES. Ces méthodologies sont intéressantes pour étudier les flux de MES, ce qui constitue encore un réel problème dès lors que l'on veut tendre vers une approche spatialisée et relativement précise dans le temps.

Abstract

Two complementary methods for estimating Total Suspended Solids (TSS) fluxes in small rural watersheds have been tested. The first method consists in correlating automatically measured turbidity with TSS concentrations. TSS fluxes can then be calculated using flow and turbidity data recorded on short intervals of several minutes. Wide and sudden variations in flow rates and TSS concentrations can thus be taken into account for flux estimations. The second method uses an in-stream sediment sampler made out of plastic pipe and placed horizontally to filtrate part of the water column. It was left in place for two weeks time. Both methods were tested during a whole hydrological year at the outlet of two small (2.2 and 4.5 km²) rural watersheds in Normandy, France.

Turbidity data require relatively long and meticulous processing to correct for long and short-term drifts, as well as for diurnal variations. The value of the method lies on the goodness of fit between turbidity values and TSS concentrations, particularly for large values. Indeed, these values, although relatively rare (<1% of the time), can account for more than 50% of the cumulated TSS fluxes over a year. Amounts of sediments collected by the in-stream samplers could be correlated with TSS fluxes estimated using the first method. Although this represents a rather crude method, these samplers could be installed, after calibration, at several locations within watersheds for flux estimations in addition to information provided on the TSS composition. The two methods seem to be an interesting approach for studying TSS fluxes in small rural watersheds for which obtaining detailed information on spatial and temporal scales remains a true issue.

Bibliographie

BERVILLE, D., 2002, *Compréhension des phénomènes de transferts particulaires en zone d'élevage, dans un sous-bassin versant de l'Oir, en Basse-Normandie, par la modélisation spatiale des paysages et pratiques agricoles*, mémoire de Dea, Cemagref Bordeaux, 115 p.

BIRGAND, F. ; BENOIST, J.-C. ; NOVINCE, E. ; GILLIET, N. ; SAINT-CAST, P. ; LE SAOS, E., Mesure des débits à l'aide de débitmètres ultrasoniques Doppler – Application à des sections calibrées en bois en hydrologie agricole, soumis à *Ingénierie-EAT*.

FOSTER, I.-D.-L. ; Charlesworth, S.-M., 1996, Heavy metals in the hydrological cycle: trends and explanation, *Hydrological Processes*, 10, p. 227-261.

GUYOT, J.-L. ; JOUANNEAU, J.-M. ; WASSON, J.-G., 1999, Characterisation of river bed and suspended sediments in the Rio Madeiro drainage basin (Bolivia , Amazonia), *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 12, issue 4, p. 401-410.

LEFRANÇOIS, J., 2003, *Caractérisation du transport particulaire sur deux ruisseaux bas-normands*, mémoire de DEA, INRA Rennes, 20 p.

LEFRANÇOIS, J. ; GRIMALDI, C. ; BIRGAND, F. ; GASCUEL-ODOUX, C. ; GILLIET, N., 2004, Spatial and temporal variations of suspended sediment loads in small catchments, European Geosciences Union, Nice, 25-30 avril 2004, Abstract n°EGU 04-03431.

MASSA, F, 2000, *Sédiments, physico-chimie du compartiment interstitiel et développement embryo-larvaire de la truite commune (Salmo trutta) : étude en milieu naturel anthropisé et en conditions contrôlées*, thèse de l'INA-PG, 199 p.

MEYBECK, M. ; DE MARSILY, G. ; FUSTEC, E., 1998, *La Seine en son bassin, fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, Elsevier, 749 p.

NOVINCE, E., 2002, *Mesure des flux de matières en suspension dans le cadre d'une étude sur le colmatage des frayères à Salmonidés dans deux bassins versants bas-normands*, mémoire de DEA, Cemagref Rennes, 78 p.

PHILLIPS, J.-M. ; RUSSELL, M.-A. ; WALLING, D.-E., in press, Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology small catchments, *Hydrological processes*.

RUSSELL, M.-A. ; WALLING, D.-E. ; HODGKINSON, R.-A., 2000, Appraisal of a simple sampling device for collecting time-integrated fluvial suspended sediment samples, in *The role of erosion and sediment transport in nutrient and contaminant transfer*, IAHS publication n° 263, p. 119-127.

STEEGENS, A. ; GOVERS, G. ; NACHTERGAULE, J. ; TAKLEN, I. ; BEUSELINK, L. ; POESEN, J., 2000, Sediment export by water from an agricultural catchment in the Loam Belt of Central Belgium, *Geomorphology*, 33, p. 25-36.

WALLING, D.-E. ; AMOS, C.-M., 1999, Source, storage and mobilisation of fine sediment in a chalk stream system, *Hydrological processes*, n° 13, p. 323-340.