

Evaluation des flux de MES à partir des suivis discrets : méthodes de calcul et incertitudes

SPM fluxes estimates from discrete monitoring : comparison of calculation methods and uncertainties

F. MOATAR(1), M. MEYBECK(2), S. RAYMOND(1), A. COYNEL(3), W. LUDWIG(4), V. MANO(5),
J. NEMERY(5), A. POIREL(6), H. ETCHEBER (3), PH. CROUZET(7)

1) UPRES-EA 2100 « Laboratoire de Géologie des Environnements Aquatiques Continentaux », Université de TOURS,
2) UMR 7619 Sisyphe, CNRS/Univ. Paris VI ; 3) UMR 5805 EPOC, CNRS/Univ. Bordeaux I ; 4) UMR 5110 CEFREM,
CNRS/Univ. Perpignan, 5) LTHE, Grenoble 6) EDF-DTG, Grenoble 7) Agence Européenne de l'Environnement

Le problème de la quantification des flux de MES est lié à la grande variabilité des concentrations et flux de MES qui ont une réponse temporelle complexe. En France, le suivi réglementaire des MES est effectué dans le cadre de la surveillance de la qualité des rivières (RNB), comme, pour les autres paramètres physico-chimiques, de façon discrète (fréquence mensuelle, bimensuelle). La question de l'évaluation des flux à partir des suivis discrets n'est donc pas nouvelle, toutefois les incertitudes n'étaient pas prises en compte. Dans ce travail, les incertitudes des différentes méthodes sont évaluées à partir d'une base de données de MES à haute résolution temporelle (données journalières, 600 années – stations) pour des bassins versants contrastés en France et aux Etats Unis (100 à 600 000 km²). Pour une méthode largement utilisée par les scientifiques et les gestionnaires, un abaque est proposé qui relie les incertitudes (biais et imprécision) à un indicateur de variabilité des flux ($M_{2\%}$ % du flux de MES transporté en 2 % du temps) pour différentes fréquences de suivi. Cet abaque permet ainsi d'une part, l'optimisation des fréquences de suivis, d'autre part, l'association d'une barre d'erreur aux flux estimés.

The SPM (suspended particulate matter) fluxes temporal variabilities are even more complex than water flows and are therefore very difficult to estimate. In France, SPM are surveyed within the national water quality survey system (RNB) and are monitored with a bimonthly or monthly frequency, as other water quality indicators. The flux calculation methods and their related uncertainties on the basis of an experimental data set of continuous – i.e. daily monitoring for contrasted river basins ranging from 100 to 100 000 km² (in France and in USA, 60 stations totalling 600 station-year of daily SPM and flows). The uncertainties, biases, and errors, result from the analysis of the distribution of errors made on simulated surveys at various frequencies (3, 5, ... 30 days) in comparison to the same value. The duration curves of SPM fluxes and the key indicator M2 %, i.e. the percentage of SPM carried in 2 % of time on a multiannual period (4 to 20 y), are then determined. The M2 % indicator is used to build-up a nomograph linking biases (median or errors) and imprecision (difference between upper and lower deciles of errors) to monitoring frequencies (3, 4, ... 30 days). This nomograph can be used to : i) optimize surveys frequencies, given a flux error target, or to ii) associate error bars. The nomograph is so far established for the mean discharge-weighted concentration method, one of the most common method with the rating curve method.

I ■ INTRODUCTION

La quantification des flux de MES dans les systèmes fluviaux est devenue une préoccupation majeure. Si dans les années 1980-1990 on s'intéressait à évaluer les taux d'érosion à l'échelle des bassins versants ou globale [1, 2], il s'agit aujourd'hui de comprendre l'influence des activités humaines et du changement climatique sur le système érosion – transferts – sédimentations [3, 4]. Les MES représentent aussi des vecteurs de pollution (carbone organique, nutriments, métaux ...) et sont utilisées pour quantifier leurs transports des continents vers les océans. Enfin les flux de MES contrôlent l'envasement des réservoirs et, dans une certaine mesure, la morphologie des lits fluviaux et des plaines

alluviales [5]. La plupart des opérateurs, Agences de l'Eau, IFEN cherchent à produire des flux annuels en réponse aux demandes internationales comme OSPAR et la Convention de Barcelone, ou locales (CIPEL sur le Léman).

Le problème de la quantification est lié à la grande variabilité des concentrations et flux de MES qui ont une réponse temporelle complexe, fonction de l'événement hydrologique, de l'ordre de la crue dans l'année, des caractéristiques naturelles et/ou anthropiques des bassins, de la gestion des barrages. En France, le suivi réglementaire des MES est effectué dans le cadre de la surveillance de la qualité des rivières, comme, pour les autres paramètres physico-chimiques. Il est réalisé de façon discrète dans le cadre du RNB (fréquence mensuelle, bi-mensuelle). La question de l'évaluation des

flux à partir des suivis discrets n'est donc pas nouvelle : Plusieurs travaux et initiatives : inventaire des méthodes de calcul, étude Inter-Agences n  28, [6], séminaires initiés par l'IFEN, (1995), qui déboucheront sur une automatisation du calcul des flux de nutriments aux stations du RNB [7]. Toutefois les incertitudes (biais et imprécisions) résultant de ces calculs automatisés, à partir de suivis discontinus, n'étaient pas prises en compte. C'est la spécificité du programme VARIFLUX soutenu par le programme ECCO/CNRS qui étudie les variations temporelles des concentrations et des flux de matière (dissoute ou particulaire en suspension) au travers de bassins versants de nature contrastée à partir des bases de données acquises avec une fine résolution temporelle (journalière) en France, Europe et aux Etats Unis. Nos objectifs généraux sont les suivants : quantifier les incertitudes sur les flux en fonction du type de surveillance et de variabilité (MES, nutriments, carbone, métaux), établir les méthodes de calcul les plus appropriées, établir les relations entre les variabilités des flux, la taille des bassins, les régimes hydrologiques et la spécificité des matériaux, optimiser les surveillances compte tenu des contraintes opérationnelles. Nous présentons ici quelques résultats pour les flux de MES.

II ■ MÉTHODE

La méthodologie (Fig. 1) utilisée est présentée en plusieurs étapes [8].

Etape 1. Constitution d'une base de données homogène à haute résolution temporelle (journalière et parfois sub-journalières), de MES, (C) et des débits (Q) en France, Europe et Etats-Unis, représentative des conditions naturelles et des impacts anthropiques et couvrant des gradients climatique, d'érodabilité des sols importants et des régimes hydrologiques variés. Cette base de données comporte actuellement environ 600 années à stations pour des bassins versants de taille de 100 à 600 000 km . Les exemples français ont été privilégiés du fait de leur large gamme : les taux de transport de sédiment (Y^*) varient de moins de 10 t/km /an dans les plaines du bassin parisien à plus de 1000 t/km /an dans les massifs alpins, sans compter des taux encore supérieurs sur les marnes de la Durance [9, 10, 11, 12, 13, 14].

Etape 2 : Caractérisation de la variabilité des MES et des flux de MES pour différentes échelles temporelles. Elle est établie par une dizaine de descripteurs statistiques, certains nouveaux, comme le M2 %, flux transporté en 2 % du temps [15, 8, 16]. En effet, dans les fleuves et rivières, les flux de Matières En Suspension (MES) peuvent varier considérablement à des échelles de temps différentes. Si de nombreuses études ont porté sur les variations spatiales, très peu d'études ont analysé les facteurs de contrôle de la variabilité temporelle fine sûrement à cause d'un manque de mesures fréquentes de MES (peu de données horaires pour

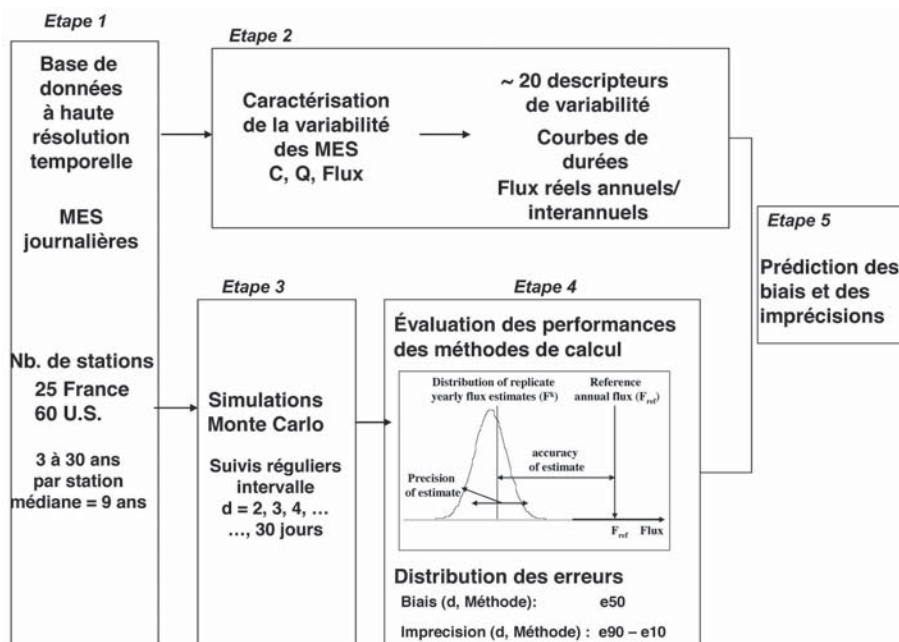


Figure 1 : Méthodologie utilisée pour l'évaluation et la prédiction des incertitudes des flux de MES à partir des suivis discrets.

les petits bassins versants ou journalières pour des bassins de moyenne et grande taille) [15, 3, 17, 14, 18].

Etape 3 : Simulation des suivis discrets à différentes fréquences, d, (ex. hebdomadaires, bi-mensuelles, mensuelles), de type RNB, pour chaque année x station par tirage au sort de type Monte Carlo : 100 tirages de type Monte Carlo ont été simulés pour chaque année pour des intervalles « d » variant de 2 à 30 jours (fréquence mensuelle).

Etape 4 : Evaluation des performances des méthodes de calcul des flux annuels en combinant les chroniques de débits en continu et les suivis discrets simulés des MES. Une vingtaine de méthodes ont été recensées dans la littérature [19]. Dans le cadre du projet Variflux, une dizaine de méthodes ont été explorées, certaines sont nouvelles. Pour chaque méthode de calcul, la comparaison des flux annuels estimés à partir des suivis discrets et des flux annuels de référence (calculés avec l'ensemble des données journalières) permet d'évaluer les incertitudes en terme de biais (erreur systématique) et d'imprécision (dispersion des erreurs). **Le biais** est défini comme étant la médiane des erreurs relatives, $100 \times (\text{Flux estimé} - \text{Flux de référence}) / \text{Flux de référence}$, **l'imprécision** comme étant la différence entre le quantile 10 et 90 % des erreurs relatives. Deux approches ont été favorisées : 1) la comparaison de plusieurs méthodes pour des sites pilotes : rivières du bassins Adour-Garonne [17], rivières Seine, Oise et Marne, (Moatar, Meybeck, en cours), 2) pour la méthode de la concentration moyenne pondérée

par les débits, méthode largement utilisée par les gestionnaires et les scientifiques, comparaison des performances pour l'ensemble des sites renseignés dans la base de donnée [8].

Etape 5 : Prédiction des biais et des imprécisions en fonction de la variabilité des flux de MES pour différentes fréquences de suivi. Nous avons pu étudier les incertitudes sur les flux de MES à 36 stations américaines et européennes couvrant une gamme importante de tailles de bassin versant et de régimes hydrologiques tempérés. Nous avons ainsi pu établir une relation générale (un abaque) entre les incertitudes et le descripteur de durées de flux pour 2 % du temps ($M_{2\%}$) pour des fréquences de suivis 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 et 30 jours.

III ■ PRINCIPAUX RÉSULTATS

● III.1 REPRÉSENTATIVITÉ DE LA BASE DE DONNÉES

La base de données couvre la plupart des conditions naturelles de la zone tempérée (écoulements spécifiques et variabilités des MES) et une gamme importante de taille de bassins versants. Les concentrations moyennes pondérées par les débits (C^*) varient entre 23 et 1 600 mg/l, les flux spécifiques (Y^*) entre 5 et 2 000 t/an/km² aussi bien pour les rivières américaines que françaises (Figure 2).

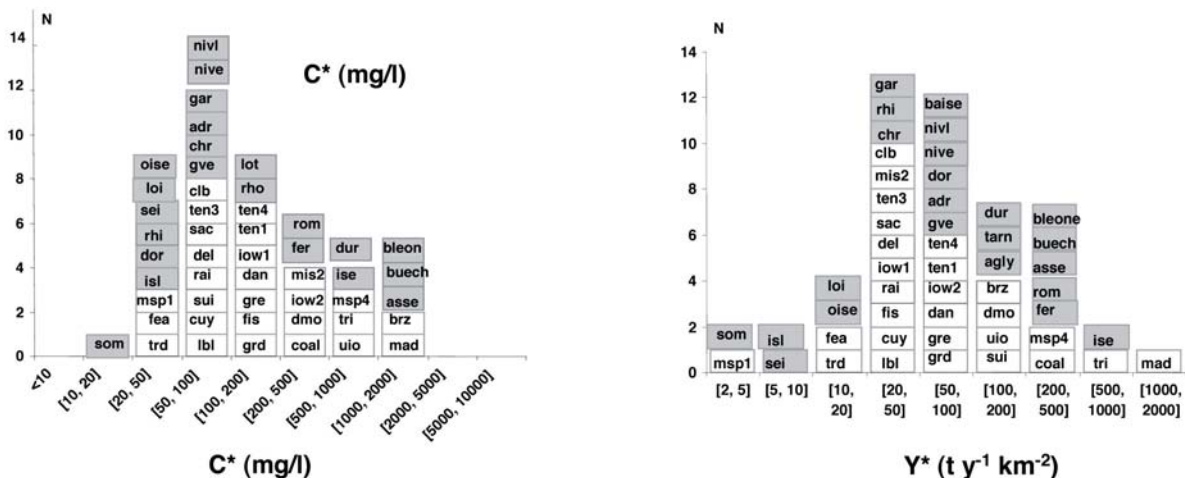


Figure 2 : Distribution des concentrations moyennes de MES (moyennes pondérées par les débits, C^* , mg l-1) et des flux spécifiques (Y^* , tonnes an-1 km-2) dans notre base de données : rivières américaines (données USGS, [8]) et rivières françaises en gris [14]. Rivières françaises : som : Somme à Abbeville, isl : Isle à Guitres, dor : Dordogne à Pessac, sei : Seine à Poses, loi : Loire à Montjean, oise : Oise à Mery, gve : Gaves à Peyrehorade, chr : Charente à Taillebourg, adr : Adour à Port de Lanne, nive : Nive des Aldudes à St Etienne, nivl : Nivelles à St Pée, rho : Rhone à Arles, lot : Lot à Temple, fer : Ferrand à Mizoën, rom : Romanche à Chambon, ise : isere à St Martin d'Hères, dur : Durance à Bombas, asse : Asse à bras d'Asse, buech : Buech à St Sauveur, bleone : Bleone à Malijai.

III.2 INDICATEURS DE LA VARIABILITÉ JOURNALIÈRE DES FLUX DE MES

Les flux journaliers sont classés du plus fort au plus faible sur la période considérée, puis cumulés en partant du plus élevé. On peut ainsi déterminer les flux d'eau et de matière transportés en 1 %, 2 %, 10 % du temps ; Les courbes flux – temps ainsi obtenues sont appelées courbes de durée [20]. Elles ont généralement une allure sigmo ide et sont équivalentes aux courbes de Gini en économie (% de revenus en fonction du % de population). L'exemple de la Figure 3 pré-

sente un faisceau de courbes pour les MES de trois groupes de stations françaises (a, b, c). On retient comme descripteur principal le pourcentage du flux atteint en 2 % du temps, noté $M_{2\%}$; il varie dans les rivières françaises documentées entre 82 % et moins de 8 % (Somme). Cette dispersion est d'abord observée en fonction de la taille des bassins, les plus petits ayant des $M_{2\%}$ plus élevés. La plupart des courbes de durée peuvent être linéarisées lorsqu'elles sont reportées dans une double échelle de probabilité d'une loi normale, ce qui permet plus facilement leur comparaison et la détermination des descripteurs tels que $M_{2\%}$, $M_{10\%}$... [15, 8].

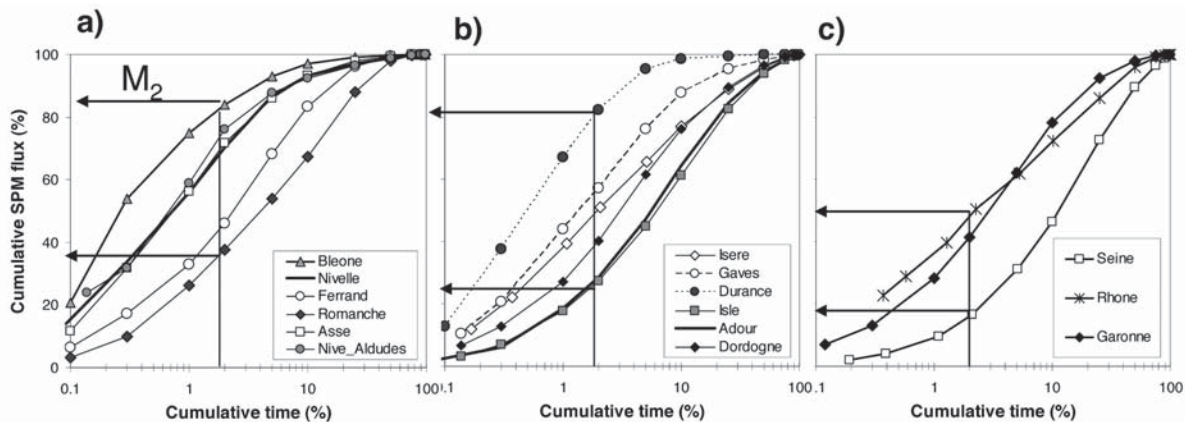


Figure 3 : Courbes de durées des flux de MES pour quelques rivières françaises : a) 100 à 1 000 km , b) 1 000 à 10 000 km , c) 10 000   100 000 km  [14].

III.3 COMPARAISON DES ESTIMATIONS DES FLUX DE MES PAR PLUSIEURS MÉTHODES POUR LES RIVIÈRES FRANÇAISES

Deux grandes types de méthodes de calcul des flux annuels sont généralement utilisées [21] : 1) d'une part les méthodes basées sur des estimateurs de moyennes des concentrations à partir des suivis discrets, dites « d'interpolation », 2) d'autre part les méthodes de régression permettant la reconstitu-

tion des concentrations en fonction des relations $C = f(Q)$ (uniques ou stratifiés par période hydrologique), dites aussi « d'extrapolation » [20]. Nous avons repris dans la figure 4 les résultats de l'étude comparative des performances de 22 méthodes testées par [19] en termes de biais et imprécision.   notre connaissance ces auteurs sont les seuls à avoir testé un nombre si important de méthodes pour trois bassins versants dans le cadre du programme LOIS (Land Ocean Interaction study).

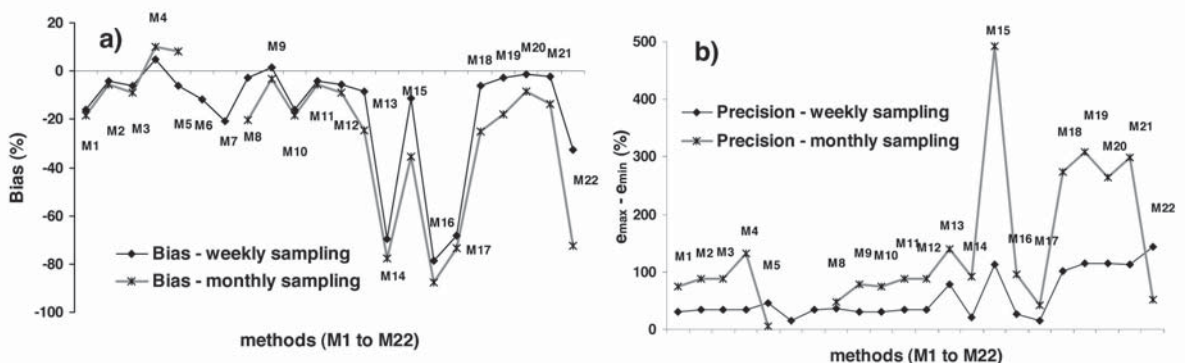


Figure 4 : Incertitudes des 22 méthodes de calcul des flux de MES testées par [19] pour la rivière Ouse (3315 km , Angleterre) en considérant des suivis hebdomadaires et mensuels : a) biais, défini comme étant la médiane (e50) des erreurs relatives, b) l'imprécision définie ici comme étant la différence des erreurs maximales et minimales ($e_{max} - e_{min}$). M1   M13 : méthodes de régression, M14   M22 : méthodes basées sur des estimateurs de moyennes de concentrations ou des flux (d'après les résultats de [19]).

L'analyse de ces graphiques montre une amélioration de l'imprécision lorsque la fréquence de mesure augmente (passage d'une fréquence mensuelle à hebdomadaire) (Figure 4b). Cependant, le gain de biais est moindre pour ces cours d'eau sauf pour les méthodes dites « d'interpolation », M14 à M21 (Figure 4a).

Dans la suite nous présentons une analyse comparative des erreurs sur les flux annuels avec deux méthodes largement utilisées : méthode M2 (régression linéaire et correction de Ferguson) et M18 (produit de la concentration moyenne pondérée par les débits et débit annuel) pour le cas de la Seine à Choisy (données journalières, 1994-2004). Pour la méthode M2, il s'agit de la reconstitution des concentrations par l'application de 100 courbes de tarage « $\log C = a \log Q + b$ » déterminées avec les données des 100 tirages de fréquence mensuelle pour l'ensemble des 10 ans.

Les résultats des deux méthodes sont très différentes (Figure 5) : La méthode M18 produit des estimations imprécises (80 % des flux estimés sont dans l'intervalle -65 % à +100 % pour l'année 2004 avec des biais de l'ordre de -10 % en moyenne mais qui peuvent atteindre -47 % pour l'année 2003 (Figure 5a). La méthode M2 est précise mais les biais sont plus importants (-18 % en moyenne) (Figure 5c). En effet les paramètres des droites de régression évaluées à partir des tirages au sort ne sont pas très différents (échantillon de 120 mesures) ce qui conduit à des estimations des flux similaires à l'intérieur d'une année. Cependant on observe que la droite de régression moyenne ne permet pas une bonne estimation pour l'ensemble des années. Les années avec des biais entre -30 et -40 % (1996-1999, 2003) sont caractérisées par des relations concentrations-débits

particulières qui diffèrent de la régression générale établie de 1994 à 2004. Les concentrations en MES sont relativement constantes (10 mg/l) pour des débits inférieurs au module (217 m³/s) puis augmentent pour des valeurs de $Q >$ module. Nous avons donc segmenté les relations C en fonction de Q pour $Q <$ et $>$ au module, dites « tronquées » (Figure 5d). Cette méthode améliore les biais à l'échelle interannuelle, mais produit des surestimations les années avec des relations $C = f(Q)$ ayant des formes particulières.

Lorsqu'on applique la méthode M18 pour estimer les flux annuels des 27 rivières américaines (1A à 27A) et 9 rivières européennes (1E à 9E) (Figure 6) avec des suivis simulés bimensuels et hebdomadaires, les biais et les imprécisions augmentent lorsque la taille des bassins versants diminue (Figure 6, rivières triées d'après la taille des bassins versants). Pour la plupart des rivières les flux annuels sont sous-estimés, du fait de la nature épisodique du transport de MES en crue, ces événements étant facilement occultés avec une fréquence régulière bi-mensuelle. Les biais les plus importants sont obtenus pour la rivière Upper Iowa à Dorchester (code 7A, 1 993 km², Iowa) : -55 % pour une fréquence bi-mensuelle, -24 % pour une fréquence hebdomadaire. Cela s'explique par la distribution fortement asymétrique des flux journaliers de MES, l'indicateur de durée M2 % pour cette rivière étant de 60 %. Pour quelques rivières, les flux annuels sont estimés avec des biais négligeables : Mississippi à St Louis (251 121 km², code 26A), Seine à Poses (65 000 km², code 9E). Pour ces rivières la distribution des flux journaliers de MES est relativement symétrique, le M2% étant beaucoup plus faible (16 %).

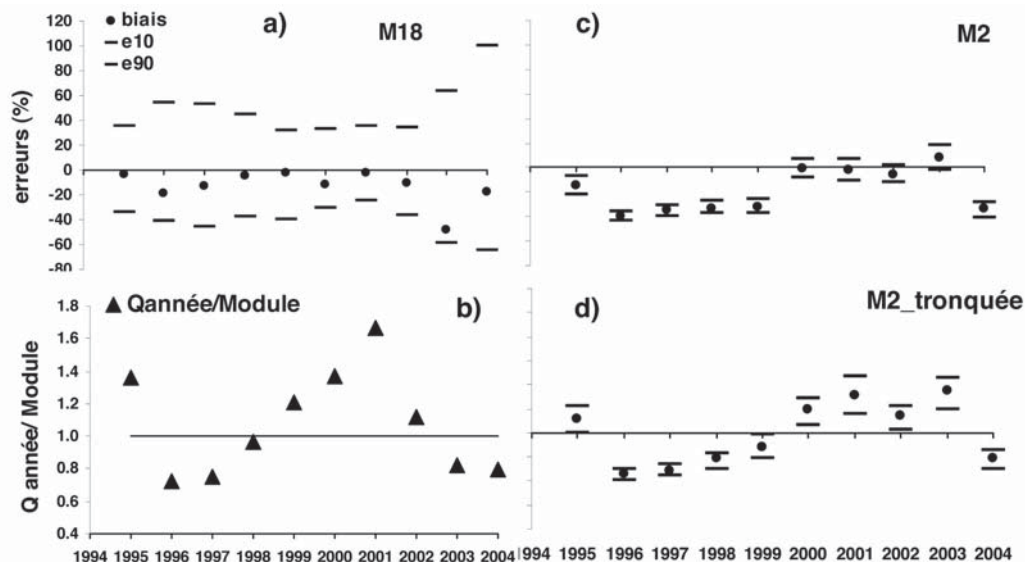


Figure 5 : Incertitudes des estimations des flux annuels de MES déterminées à partir des simulations avec une fréquence mensuelle pour la Seine à Choisy, 1994 à 2004. a) méthode M18, concentration de la Moyenne pondérée par les débits, b) évolution des débits annuels (normés par rapport au module), c) méthode M2, reconstitution des concentrations en MES par la régression linéaire avec correction de Ferguson, d) méthode M2_tronquée, reconstitution des concentrations avec deux régressions, segmentées par rapport au module.

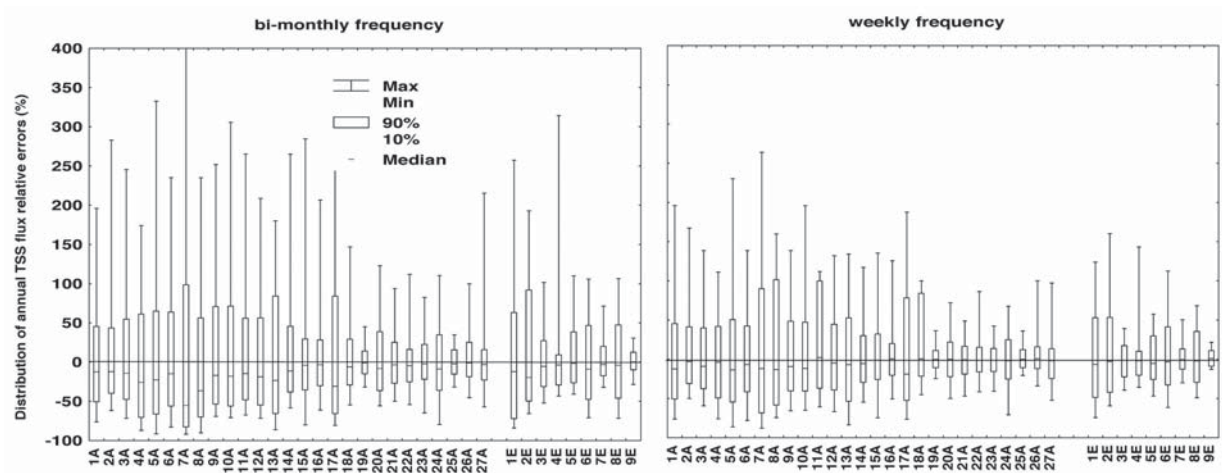


Figure 6 : Incertitudes des estimations des flux annuels de MES déterminées à partir des fréquences simulées bi-mensuelle et hebdomadaire (valeurs interannuelles) : 27 rivières américaines et 9 rivières françaises triées d’après la taille du bassin versant [8]. Rivières européennes : 1 E : Gaves à Peyrehorade, 2 E : Isère à Saint Martin d’Heres, 3 E : Isle à Guitres, 4 E Charente à Taillebourg, 5 E : Adour à Port de Lanne, 6 E : Dordogne, 7 E : Rhin à Maxau, 8 E : Garonne à la Réole, 9 E : Seine à Poses.

● III.4 PRÉDICTION DES INCERTITUDES PAR UN ABAQUE BASÉ SUR LA DURÉE DES FLUX EN 2 % DU TEMPS ($M_{2\%}$) [8]

On a considéré la méthode de la concentration moyenne pondérée par les débits (méthode M18). Les données des rivières américaines sont utilisés pour générer une relation générale entre les incertitudes (biais, e50 ou médiane des erreurs relatives et imprécision, e90-e10, écart entre les déciles des erreurs) et le descripteur de durées de flux pour 2 % du temps, $M_{2\%}$, pour toutes les stations et pour des fréquences de suivis de 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25 et 30 jours. Ainsi, pour la fréquence de 7 jours, on obtient de très bonnes relations entre incertitudes et descripteur $M_{2\%}$ (Figure 7).

En combinant ensuite les courbes représentatives de chaque fréquence on obtient 3 familles de courbes formant l’abaque des incertitudes des flux annuels établie sur les courbes de durée ($M_{2\%}$) avec une méthode largement utilisée par les scientifiques et les gestionnaires des hydrosystèmes.

Ces abaques montrent que pour avoir des flux annuels estimés avec des biais inférieurs à -1 ou 2 % et des imprécisions à ± 20 %, les intervalles requis entre deux mesures consécutives sont les suivants : < 3 jours pour des rivières ayant un $M_{2\%} > 40$ %, entre 3 et 5 jours pour des rivières ayant un $M_{2\%}$ compris entre 30 et 40 %, entre 5 et 12 jours pour des rivières avec $M_{2\%}$ entre 20 % et 30 %, entre 20 et 12 jours pour $M_{2\%}$ entre 15 % et 20 % (Figure 8).

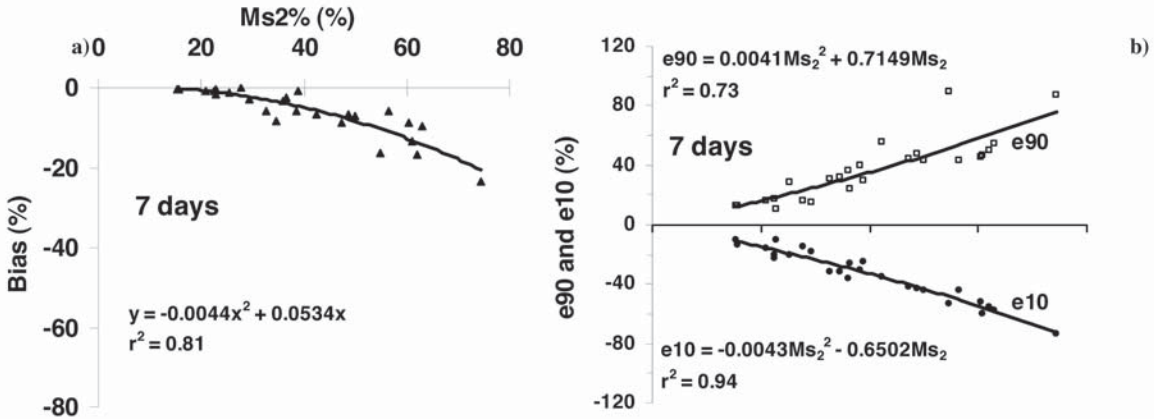


Figure 7 : Incertitudes des flux annuels (calculés par la moyenne pondérée par les débits, M18) en fonction de l’indicateur $M_{2\%}$ de durée des flux. Fréquence hebdomadaire : a) biais vs. $M_{2\%}$, b) Décile supérieur et inférieur des erreurs relatives vs. $M_{2\%}$ (imprécision = $e_{90} - e_{10}$) [8].

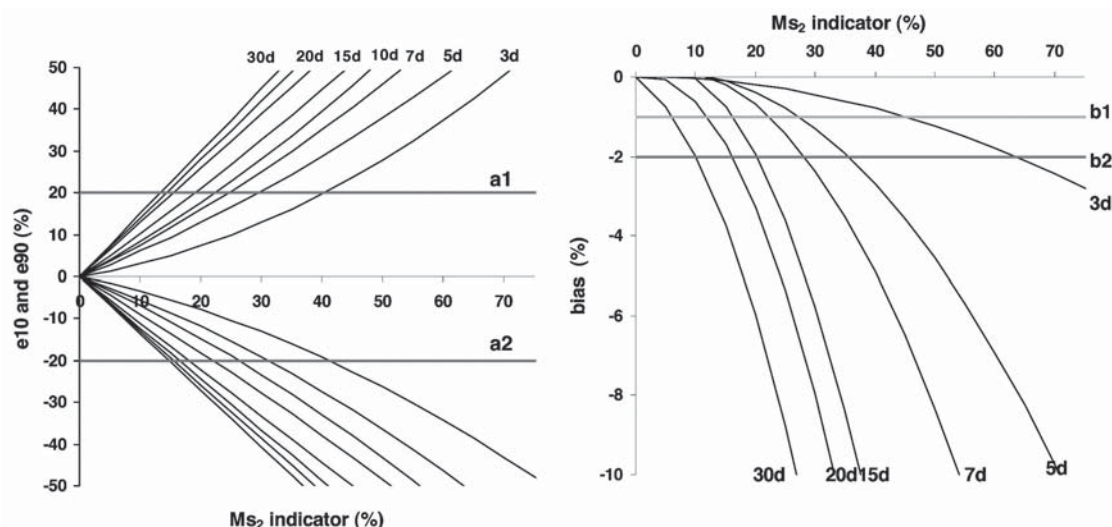


Figure 8 : Abaque des incertitudes des flux annuels de MES (méthode de la concentration moyenne pondérée par les débits) : a) déciles inférieurs et supérieurs des erreurs relatives pour différents intervalles de suivis : 3, 5, 7 ... 30 jours, b) biais pour différents intervalles de suivis ; a1 et a2 = limites imposées de précision à $\pm 20\%$, b1 et b2 = limites imposées de biais à -1% et -2% . [8]

IV ■ CONCLUSIONS

Les biais et les imprécisions des estimations des flux annuels de MES avec la méthode M18 (concentration moyenne pondérée par les débits) ont été évalués par des simulations Monte Carlo pour des intervalles de suivi allant de 2 à 30 jours pour 36 stations caractérisés par différents régimes de transport solide et gamme de taille de bassins versants. Comme d'autres auteurs l'ont démontré, les incertitudes (à la fois les biais et les imprécisions) diminuent quand la fréquence de suivi augmente. De plus, les biais sont systématiquement négatifs, sauf pour des intervalles de suivis faibles (2 à 5 jours) quand les biais tendent vers zéro. Comme beaucoup des estimations sont réalisées avec la méthode M18, il est important de montrer que les imprécisions sont très importantes : $> 80\%$ pour des bassins avec une taille de 1 000 à 10 000 km², 40-80 % pour des bassins de 10 000 à 100 000 km² et $< 40\%$ pour des bassins ayant des superficies $> 100\,000$ km². L'intervalle de suivi doit donc être réduit ou alors d'autres méthodes doivent être employées pour atteindre des biais négligeables et réduire les imprécisions.

Enfin, il est important d'observer que le descripteur M2 % qui fonde notre abaque pour la méthode M18 n'est en fait pas connu dans le cadre des suivis normaux ; son application est limitée. Nous recherchons donc les relations entre M2% et les autres identifiants des stations et des variables connues : i) la durée des flux d'eau (% du flux d'eau transporté en 2 % du temps, Vw2), ii) les relations concentrations – débits. On utilisera ensuite les M2 % estimés pour chaque station avec l'abaque général pour affecter une incertitude aux suivis existants ou alors pour proposer des fréquences de suivi en fonction de la variabilité supposée des flux de MES et d'objectifs d'incertitudes des flux. Il s'agit ainsi d'optimi-

ser la fréquence de suivis des MES en fonction des caractéristiques propres à la station. Les estimations des flux à différents pas de temps (1, 2, 3, ... 6 ans) et des incertitudes correspondantes font également l'objet de nos recherches en cours. Pour une même incertitude les flux pluriannuels sont bien plus représentatifs des variations hydrologiques interannuels. Les méthodes utilisant des modélisations empiriques (régression Log C - Log Q « tronquée » par période hydrologique et modèles neuronaux) semblent plus adaptés pour reconstituer les concentrations en MES et donc les flux annuels.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien financier des programmes ECCO et EC2CO de l'INSU/CNRS/ANR. Nous remercions les différents organismes qui nous ont mis à disposition des données de MES à haute résolution temporelle : SEDIF-CGE pour les données de la Seine, Marne et Oise, National Center for Water Quality Research, Heidelberg College, Ohio, pour les données des tributaires du lac Érié, USGS pour les rivières américaines.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] MILLIMAN J.D., SYVITSKI J.P.M. (1992) — Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean : The Importance of Small Mountainous Rivers. *The Journal of Geology*. **100** : 525-544
- [2] LUDWIG W., PROBST J.L. (1998) — River sediment discharge to the oceans : present-day controls and global budgets. *American Journal of Science*. **298** : 265-295

- [3] WALLING D.E., FANG D. (2003) — Recent Trends In The Suspended Sediment Loads Of The World's Rivers. *Global And Planetary Change*. **39** : 111-126
- [4] VÖRÖSMARTY Ch, MEYBECK M, FEKETE B, SHARMA K, GREEN P, SYVITSKI J. (2003) — Anthropogenic sediment retention : major global impact from registered river impoundments. *Global And Planetary Change*. 1-22
- [5] BRAVARD ET PETIT (1997) — *Les cours d'eau. dynamique du système fluvial*. Armand Colin / Masson, Paris. 221 pages
- [6] MEYBECK M., RAGU A., PASCO A. (1996) — *Etablissement des flux polluants dans les eaux superficielles : Tome 1 : Introduction, paramètres classiques et méthodologie de calcul des flux, Tome 2 : Micropolluants organiques et minéraux, Tome 3 : Traitements statistiques, points forts, points critiques, recommandations et annexes générales. Etude Inter-Agences n° 28*.
- [7] CROUZET P., G. LE GALL, M. MEYBECK (2002) — Flux à la mer : trop d'azote, mais moins de phosphore. *IFEN – Les données de l'environnement : eau – littoral*, Orléans. 1-4
- [8] MOATAR F., PERSON G., MEYBECK M., COYNEL A., ETCHEBER H., CROUZET Ph. (2006) — The influence of contrasting suspended particulate matter transport regimes on the bias and precision of flux estimates. *Science of the Total Environment*. **370** : 515-531
- [9] POIREL A. (1998) — Essai de modélisation des flux solides dans l'Isère à Grenoble. relations avec l'hydroclimatologie. *La Houille Blanche*. **5/6** : 138-145
- [10] MEYBECK M. (2001) — Transport et qualité des sédiments fluviaux : de la variabilité spatio-temporelle à la gestion. *La Houille Blanche*. **6/7** : 34-45
- [11] SERRAT P., LUDWIG W., NAVARRO B., BLAZI J.-L. (2001) — Variabilité spatio-temporelle des flux de matières en suspension d'un fleuve côtier méditerranéen : La Têt (France). *C.R. Acad.Sci Paris*. **333** : 389-397
- [12] PONT D., SIMONNET J.-P., A.V. WALTER (2002) — Medium-term changes in suspended sediment delivery to the ocean : consequences of catchment heterogeneity and river management (Rhône River, France). *Estuarine, Coastal And Shelf Science*. **54** : 1-18
- [13] COYNEL A., SCHAFER J., HURTREZ J.-E., DUMAS J., ETCHEBER H., BLANC G. (2004) — Sampling frequency and accuracy of spm flux estimates in two contrasted drainage basins. *Science of the Total Environment*. **330** : 233-247
- [14] MANO V., MOATAR F., COYNEL A., ETCHEBER H., LUDWIG W., MEYBECK M., NEMERY J., POIREL A., BLANC G., SCHAFER J. (2006) — Space and time variability of suspended particulate matter (SPM) transport in 32 French rivers (100 to 100 000 km² ; daily to yearly). In "Sediment dynamics and hydromorphology of fluvial systems", ICCE IAHS International Symposium, 3-7 July 2006, Dundee, Scotland, (Poster Report Booklet). 29-37
- [15] MEYBECK M., LAROCHE L., DURR Hh., SYVITSKI Jpm. (2003) — Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. *Global and planetary change*. **39** : 65-93
- [16] MOATAR F., MEYBECK M. RIVERINE (2007) — Fluxes of pollutants : towards predictions of uncertainties by flux duration descriptor. *C.R. Geoscience, Hydrology-Hydrogeology*. **339** : 367-382
- [17] COYNEL Alexandra (2005) — *Erosion mécanique des sols et transferts géochimiques dans le bassin Adour-Garonne*, Thèse de l'Université de Bordeaux I ; Chapitre III. Variabilité temporelle et spatiale des flux de MES du bassin Adour-Garonne.
- [18] GALEA G., RAMEZ P., ADLER M.J., ROTARU E. (2004) — Modélisation statistique des apports de MES associés au régime des crues d'un sous bassin du Timis-Béga (Roumanie). *Revue des Sciences de l'Eau*. **17/4** : 471-488
- [19] PHILIPPS Jm, WEBB Bw, WALLING De, LEEKS Gjl. (1999) — Estimating the suspended sediment load of rivers in the LOIS study area using infrequent samples. *Hydrological Processes*. **13** : 1035-1050
- [20] WALLING D.E., WEBB B. The reability of suspended sediment load data. *Iahs Publication Ed.Erosion And Sediment Transport Measurement, Iahs Pub, Florence*. 177-194
- [21] QUILBÉ R., ROUSSEAU A.N., DUCHEMIN M., POULIN A., GANGBAZO G., VILLENEUVE J.-P. Selecting A calculation method to estimate sediment and nutrient loads in streams : application to the Beaurivage River (Québec, Canada). *Journal of Hydrology*. **326** : 295-310