

Les stocks sédimentaires en Seine : de la région parisienne à l'estuaire

Philippe Bonté (LSCE, Gif sur Yvette)
Alain Thomas (UMR Sisyphe, Univ. Paris-6)
Jean-Marie Mouchel (CEREVE, Champs sur Marne)
Stéphane Sogon (LSCE, Gif sur Yvette)
Laure Tessier (LSCE, Gif sur Yvette)

En complément aux études de dynamique sédimentaire à petite échelle spatiale réalisées dans la zone à l'aval d'Achères, nous présentons ici les résultats acquis sur le tronçon de la Seine compris entre le confluent de l'Oise et la limite de l'estuaire à Poses. L'objectif est la détermination des masses de sédiments susceptibles d'être impliquées dans le transport des polluants vers le mer. L'outil utilisé est le traçage des particules par des radioéléments présents dans l'environnement. Cette méthodologie a déjà été exposée (Bonté et al., 1999), avec une application préliminaire limitée à l'étiage 1999 (Bonté et al., 2000). Nous en rappellerons brièvement le principe, qui tout d'abord exige un suivi continu de la radioactivité des MES aux limites amont et aval du système.

1. Echantillonnage

Ainsi que cela avait été prévu, la base de données a été étendue à des situations hydrologiques plus variées, incluant débits moyens et crues hivernales, sur un cycle annuel complet. A cette fin, les prélèvements en continu des MES à l'aide de pièges à sédiment, débutés en juillet 1999, ont été poursuivis jusqu'en septembre 2000, soit au total durant 15 mois.

A l'amont, 29 échantillons ont été prélevés à Andrésy, mais l'échantillonnage a dû être momentanément décalé à Chatou en août 2000 (2 échantillons; on a vérifié par ailleurs avec 3 autres échantillons l'absence de décalage systématique avec les mesures à Andrésy). Mais la station amont à Denouval a dû être abandonnée après la collecte de 17 échantillons en raison de disparitions répétées des pièges installés; les résultats de l'étiage 1999 avaient montré des différences entre Andrésy et Denouval, imputables à l'influence de l'Oise dans cette dernière station, dont l'abandon après les crues de l'hiver 2000 pourrait affecter la représentativité des apports amont. A Poses, 26 échantillons ont été prélevés mais 2 pièges ont été perdus durant l'étiage 1999. A part ces rares lacunes, l'échantillonnage a bien couvert la période d'étude.

2. Contexte hydrologique et sédimentaire

2.1. Estimation des MES

Les débits liquides utilisés sont ceux mesurés à Poses par le SNS. Les MES ont été mesurées par filtration lors des relevés des pièges à sédiment. Pour pallier leur discontinuité, nous avons utilisé les MES calculées à partir des turbidités (NTU), soit à la limite amont celles, hebdomadaires, de la Lyonnaise des Eaux à Suresnes, calibrées pour la zone d'Achères, et à l'aval celles, quotidiennes, du SNS à Poses. En comparaison, nos mesures de MES ponctuelles tendraient à être un peu plus faibles à l'amont et un peu plus fortes à l'aval. En admettant - arbitrairement - que nos mesures soient meilleures, il en résulterait que les différences de débits solides amont - aval que nous avons calculées ci-dessous seraient sous-estimées.

2.2. Bilan des débits solides

Il est illustré sur les Fig. 1 et 3 et résumé dans la Table 1. Durant les 6 mois qui ont précédé le début de nos prélèvements, la crue de février-mars 1999 a été moins importante que celle de l'hiver 2000; l'estimation d'une expulsion nette de 99 kt de MES est quelque peu imprécise en raison de lacunes dans les mesures. Durant ces 6 mois, le bief Andrésey-Poses a perdu 81 kt de sédiment, les expulsions en débits moyens et de crue (maximum $1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) n'ayant pas été compensées par la rétention nette de 49 kt durant le début de l'étiage.

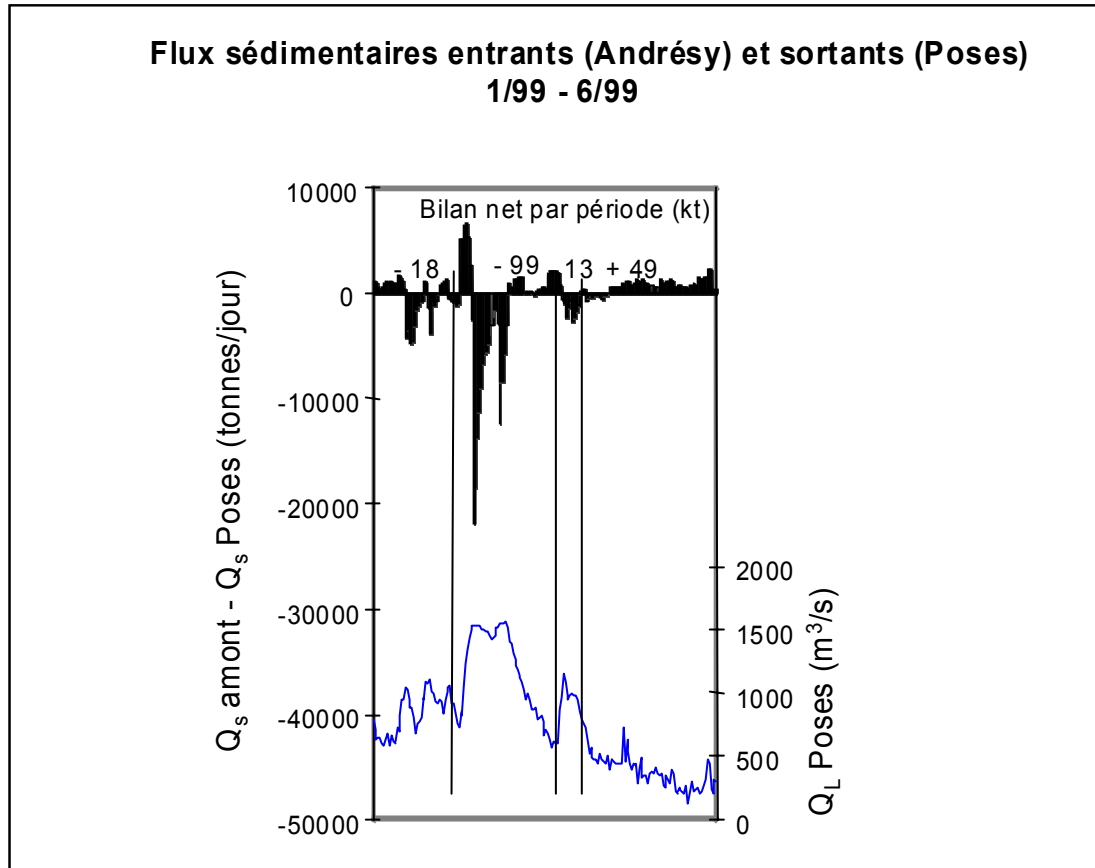


Figure 1. Bilan des flux de MES antérieurs à cette étude.

Au début de nos prélèvements, durant l'étiage marqué de l'été 1999 (période 1), les flux sédimentaires sont à peu près équilibrés; lors de la restauration des débits moyens de l'automne (période 2), on constate un début d'érosion à peine significatif (8 kt). Les crues de l'hiver 2000 (période 3), qui ont atteint $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ont provoqué une expulsion nette plus importante que l'année précédente (440 kt). Cette perte est essentiellement due à la première crue hivernale (395 kt en 3 semaines du 14 décembre au 5 janvier), la deuxième étant comparativement mineure (Fig. 2). Du printemps à l'été suivant (périodes 4 et 5), le bilan des flux montre une tendance croissante à la rétention des apports.

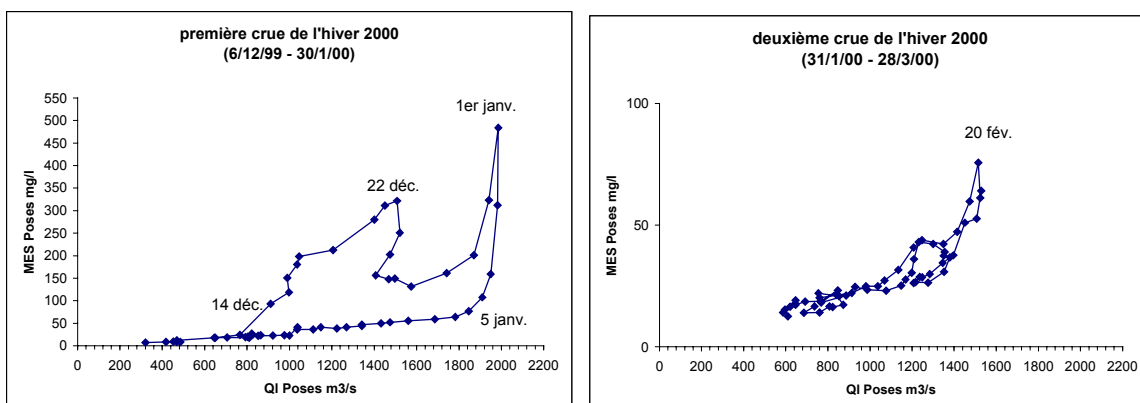


Figure 2. Relations MES - débit pour les crues de l'hiver 2000.

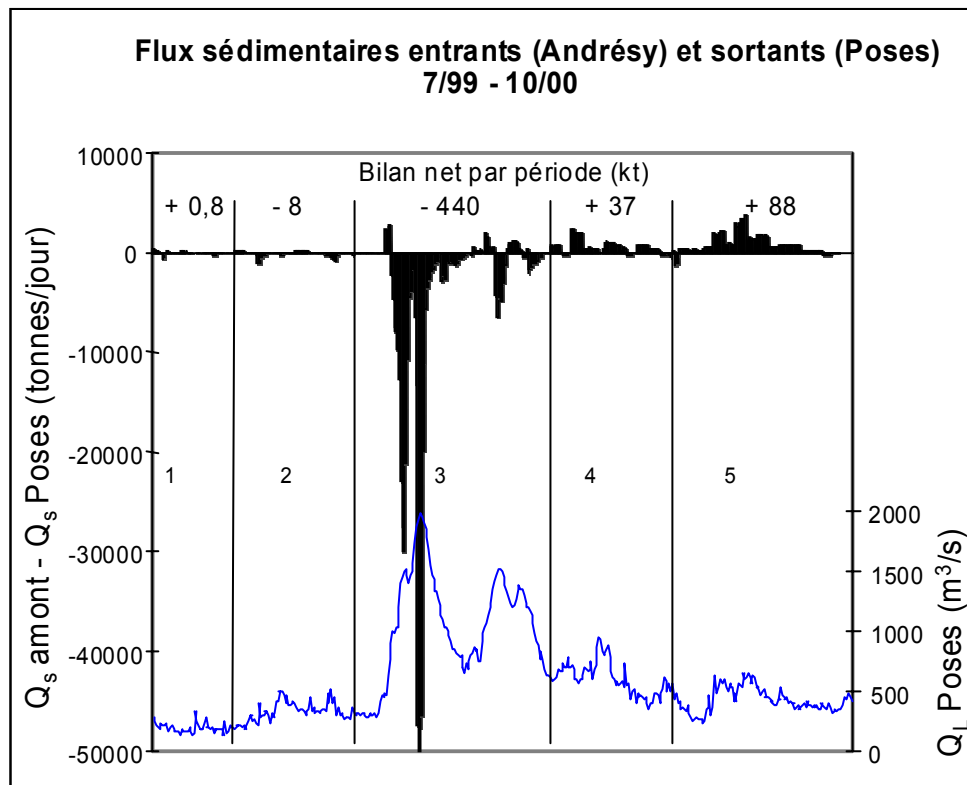


Figure 3. Bilan des flux de MES lors de cette étude, subdivisée en 5 périodes.

Les années 1999-2000 montrent bien comment le système se vide lors des crues et se remplit après elles. Au total, durant ces 21 mois, le bilan est déficitaire d'environ 400 kt, ce qui est important en comparaison du débit solide moyen à Poses (≈ 700 kt an⁻¹). Il apparaît en particulier que la source des matériaux expulsés durant les crues de l'hiver 2000 ne peut trouver son origine dans les accumulations durant les 8 mois qui ont suivi les crues de l'hiver précédent et qu'il faut admettre une érosion importante de sédiments plus anciens.

3. Traçage radioactif des masses sédimentaires

3.1. Nature des traceurs radioactifs

Les traceurs utilisés sont d'origine naturelle. Il s'agit d'un isotope cosmogénique du béryllium, le ⁷Be, de période égale à 53 jours qui, apporté par les précipitations, se fixe sur les particules, et d'un isotope du thorium, le ²³⁴Th, de période égale à 24 jours, qui se forme dans l'eau à partir de l'uranium dissous issu de l'altération des roches; ce traceur, très insoluble, vient aussi se fixer sur les particules. Les minéraux contiennent aussi dans leur réseau cristallin de l'uranium, et donc du ²³⁴Th qui est inutile car, aussitôt reformé par l'uranium lorsqu'il se désintègre, il ne décroît pas avec le temps. On le soustrait donc du ²³⁴Th total mesuré dans les sédiments pour obtenir le thorium utile, "en excès", qu'on note ²³⁴Th_{xs}. Les mesures sont effectuées par spectrométrie gamma à bas niveau. Très généralement, les erreurs sur ces mesures sont insignifiantes par rapport aux sources d'incertitude du modèle utilisé.

3.2. Calcul des flux de traceurs

Les concentrations des traceurs ont été mesurées dans les MES récupérées par les pièges à sédiment à l'amont et à l'aval du système; elles ont été pondérées par les débits solides lorsque les calculs ont été faits sur une période comprenant plusieurs échantillons.

La retombée atmosphérique en ^7Be a été calculée à partir d'une relation établie entre les flux de dépôt mesurés par l'OPRI et le CEA, et la pluviométrie de Météo-France sur 5 stations réparties entre Paris et Rouen : Flux ($\text{Bq m}^{-2} \text{ mois}^{-1}$) = $1.06 \times \text{précipitations (mm mois}^{-1}) + 14$. Les précipitations ont varié de 1 à 311 mm mois^{-1} selon les échantillons, mais diffèrent peu au cours des 5 périodes de l'étude ($50\text{-}90 \text{ mm mois}^{-1}$). L'erreur sur la retombée en ^7Be , qui ne contribue qu'à 10-28 % des flux d'entrée totaux, n'est pas critique dans les bilans de flux de ce traceur.

La production de ^{234}Th à partir de l'uranium dissous a été calculée à partir d'une concentration en U dissous de $0.48 \pm 0.09 \mu\text{g l}^{-1}$ (4 mesures de l'OPRI) ; la représentativité de cette moyenne est sujette à caution, et des mesures dans la Seine vont être entreprises pour affiner ce paramètre dont l'effet sur la modélisation du $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$ est loin d'être négligeable.

3.3. Principe de la modélisation

Il s'agit de tirer parti de la différence des flux d'entrée et de sortie de radioéléments de courte période transportés avec les particules sédimentaires. On considère qu'au cours de périodes relativement brèves (2 à 4 mois) et caractérisées par une hydrologie donnée, le bilan des traceurs radioactifs par unité de temps doit être équilibré : les entrées (apports fluviaux amont, pluie, désintégration de U dissous) sont égales aux sorties (sortie fluviale aval, désintégrations du traceur durant le transport des particules). Le même principe a été appliqué aux périodes plus courtes (1 à 4 semaines) correspondant à l'acquisition d'un seul échantillon :

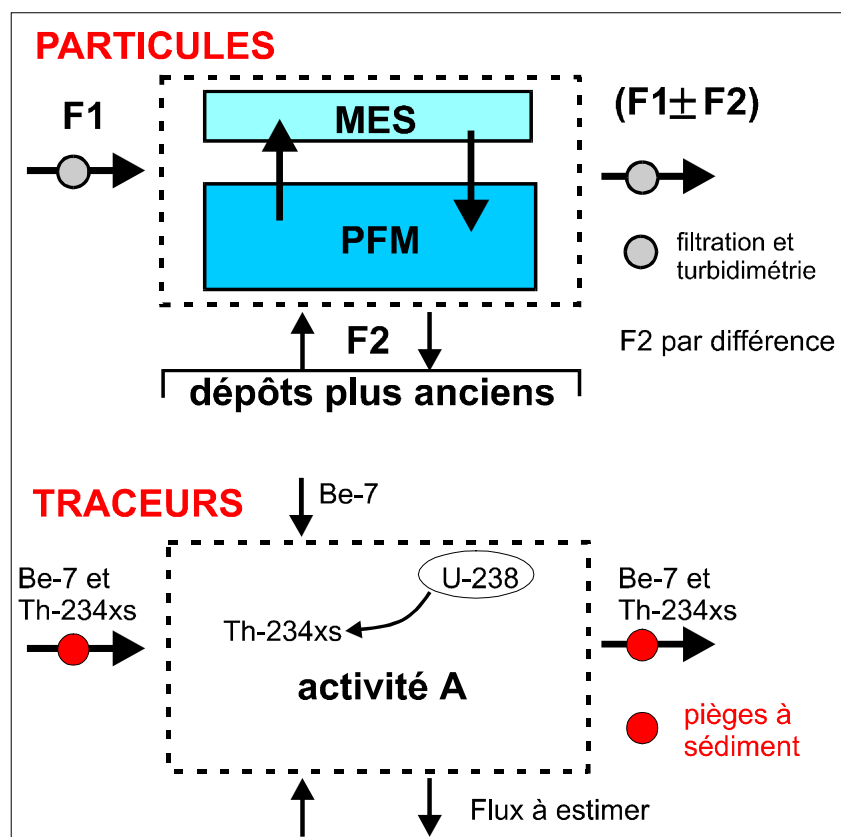


Figure 4. Principe du modèle.

Les relations entre les concentrations particulières (MES) et dissoutes ont été calculées à partir d'un coefficient de distribution constant : $K_d (\text{l kg}^{-1}) = \text{concentration par kg de particules} / \text{concentration par litre d'eau}$. Pour le Be, on a utilisé un K_d de 50000 l kg^{-1} , estimé à partir de diverses mesures fluviales; pour le Th on l'a estimé à $\sim 10^6$ (cette valeur forte n'a pas besoin d'être connue avec précision).

En régime stationnaire (Fig. 4), le bilan du traceur est :

$$\text{entrées} = \text{sorties} + \text{désintégration D}$$

Les entrées comprennent les apports fluviaux amont (déterminés à partir des concentrations mesurées dans les MES et des Kd) et, le cas échéant le dépôt par les précipitations (^7Be) ou la formation interne (^{234}Th). Il peut s'y adjoindre un apport à partir des "dépôts plus anciens", à estimer. Les sorties comprennent les pertes à Poses (déterminées comme à l'amont) et, éventuellement, la formation d'un dépôt dans la boîte, à estimer. La différence donne la perte par désintégration dans le système, qui est proportionnelle à l'activité totale A qu'il contient :

$$D = A (\lambda \text{ est la constante radioactive} = \ln(2) / \text{période}), \text{ ce qui donne } A.$$

Une partie des traceurs est en solution, l'autre (celle qui nous intéresse) est fixée sur les particules.

$$A = A_d + A_p$$

Si on connaît de plus la concentration moyenne C_p du traceur dans les particules du système, on peut calculer la concentration dissoute moyenne. On a approximé C_p par la moyenne des concentrations dans les particules entrantes et sortantes, car des profils longitudinaux répétés n'étaient pas envisageables :

$$C_d = C_p / K_d$$

La détermination du volume d'eau V du bief en fonction du débit par le modèle ProSe donne la fraction de l'activité dissoute :

$$A_d = C_d V$$

D'où l'activité particulaire dans le système :

$$A_p = A - A_d$$

La concentration du traceur dans les particules étant le rapport activité / masse, on obtient finalement

$M = A_p / C_p$, où M est la **masse totale des particules "réactives"**, c'est à dire celles qui, dans le milieu aquatique, ont été en contact avec l'eau à partir de laquelle elles ont fixé le traceur. C'est, selon le même principe, la masse de particules susceptible de fixer **n'importe quel polluant à forte affinité pour les particules sédimentaires**.

Ensuite, la connaissance (indépendante) des débits solides Q_s à l'aval donne le temps de résidence de ces particules :

$$t = M / Q_s.$$

3.4. Particules : une nuance essentielle

Il existe évidemment un certain continuum entre les particules en suspension "permanente" (MES), celles qui ne sont remises en suspension qu'occasionnellement aux forts débits ou à cause de la navigation, celles qui ne seront recyclées qu'au cours de crues exceptionnelles, et enfin les dépôts sédimentaires "permanents". Il est apparu que le rôle de la remise en suspension par la navigation était important et que la vitesse de sédimentation des particules resuspendues était rapide. Il fallait trancher dans ce continuum pour pouvoir modéliser, car ce dont nous avons besoin, ce sont uniquement les **particules susceptibles d'échanger des éléments chimiques avec la colonne d'eau**.

Par conséquent, un distinguo a été introduit dans le concept de particules. Nous avons considéré que le système fluvial comportait deux stocks distincts de particules (Fig. 4) :

- les **MES**, qui sont les particules qu'on peut échantillonner dans la colonne d'eau;
- les "particules facilement mobilisables" (**PFM**), généralement déposées en couche mince à la surface des dépôts, et qui échappent aux moyens de prélèvement et d'observation courants.

Les alternances resuspension / dépôt mettent ces deux stocks en échange permanent et rapide, ce qui autorise à faire l'hypothèse que leurs concentrations en traceurs sont identiques.

Ainsi qu'on l'a montré ci-dessus, l'existence de périodes d'érosion de dépôts "anciens" vient compliquer cette approche puisqu'il s'agit là de matériaux de nature inconnue, susceptibles de modifier les flux d'entrée des traceurs, s'ils en contiennent encore. Dans la mesure où les sédiments érodés durant la crue de l'hiver 2000 paraissent stockés dans le bief depuis au moins un an, leurs concentrations en traceurs doivent être très faibles, et on les a considérées comme nulles. D'autre part, la différence des flux de traceurs entrants et sortants, à partir de laquelle on calcule la décroissance dans le système, ne lui est pas entièrement attribuable lorsque une partie de l'apport sédimentaire amont reste piégée dans le système. Les concentrations du traceur dans ces particules piégées ne sont pas connues; on a donc admis qu'elles étaient au plus égales à celles dans les particules entrantes afin d'examiner les conséquences d'une telle correction sur les masses calculées.

3.5. Aux limites du modèle

Le modèle étant basé sur une différence de flux, encore faut-il qu'elle existe, et dans le bon sens. A priori, les situations de forte crue sont inappropriées. La Fig. 5 compare les concentrations en ^{137}Cs (radioélément de 30 ans de période apporté par l'érosion des particules des sols auxquelles il est fixé depuis environ 40 ans) dans les sédiments déposés au Vésinet (mesures de l'OPRI) et dans les MES à l'amont et à l'aval du bief. D'une façon générale, les concentrations dans les MES sont plus fortes que dans les sédiments déposés car ces derniers sont moins riches en particules argileuses fines, ainsi que le confirme la proportionnalité entre le ^{137}Cs et le potassium qui est surtout inclus dans les argiles (Fig. 5).

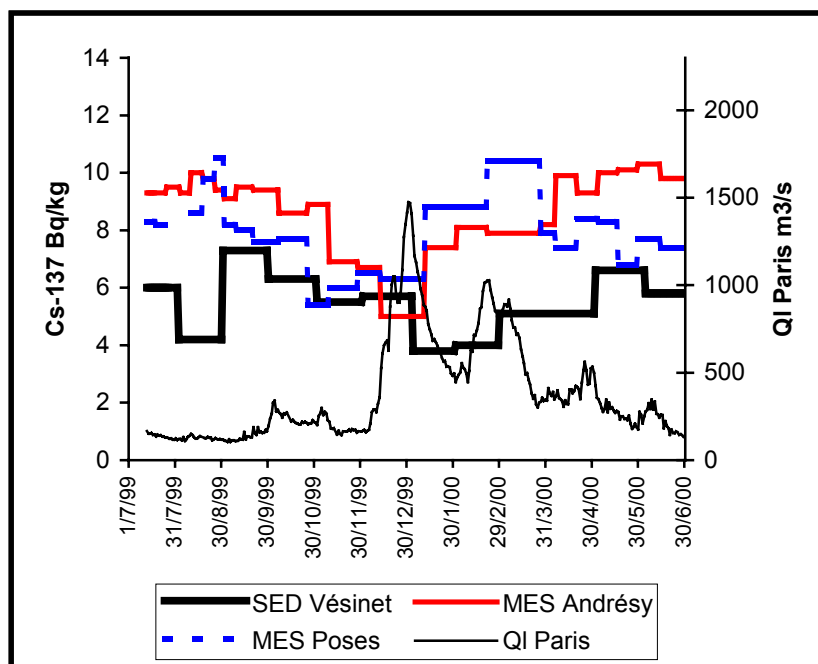


Figure 5. Concentrations du ^{137}Cs dans les particules des pièges à sédiment. Comparaison avec les sédiments déposés (OPRI).

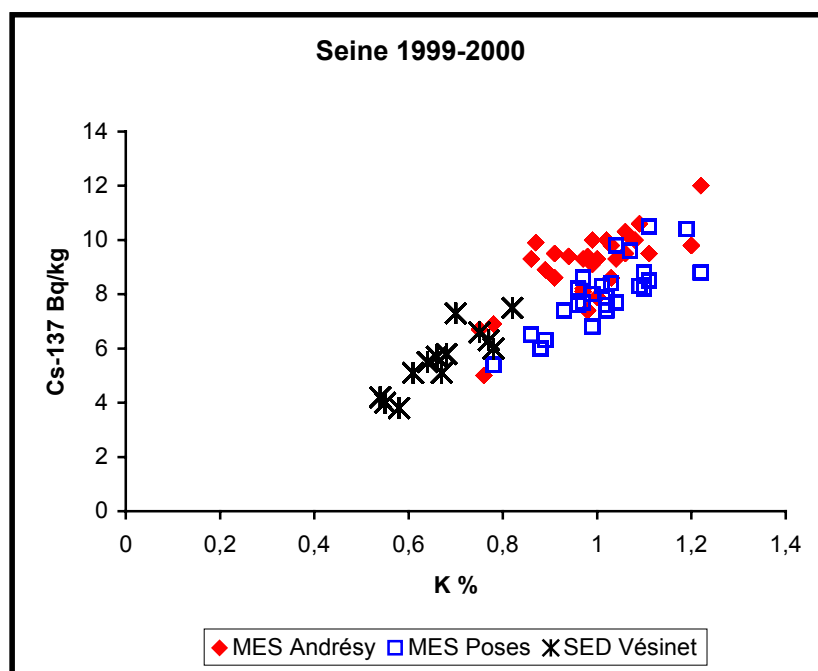


Figure 6. Relation entre les concentrations en ^{137}Cs et en potassium.

Mais on voit bien que ces trois stock sédimentaires ont à peu près les mêmes concentrations lors de la première crue de l'hiver 2000. Ceci signifie qu'à cette période les MES et les sédiments ne forment plus qu'un stock granulométriquement homogène et relativement grossier. La présence du ^{137}Cs indique que ce stock ne peut être essentiellement constitué par l'érosion de sols datant de plus de 40 ans (pas encore contaminés par les retombées nucléaires), mais ceci ne permet pas de contraindre plus précisément l'âge des sédiments érodés. Un âge aussi ancien est d'ailleurs improbable lorsqu'on constate que ces MES contiennent 40-65 Bq/kg d'un radioélément naturel de 22 ans de période, le $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$, concentration qui diffère peu de celles mesurées habituellement à Poses lors de cette étude. Il est difficile d'en dire plus.

On peut donc s'attendre à ce que le schéma courant où les concentrations en Be-7 sont plus fortes à l'amont qu'à l'aval ne s'applique plus. De fait, la Fig. 7 montre que, durant les crues de l'hiver 2000, les différences de concentrations sont extrêmement réduites et les concentrations sont faibles.

Dans ces circonstances, la différence entre les flux de traceurs particuliers entrants et sortants devient très faible (malgré l'existence des sources externes qui renforcent les entrées, mais assez peu), et de petites erreurs sur les flux (valeur des MES et concentrations dans les celles-ci), ont de grosses conséquences sur leur différence. Il en résulte que l'erreur sur les masses sédimentaires calculées peut être considérable. On ajoutera que lors du maximum de cette crue, la durée de l'échantillonnage (29 jours) a été trop longue pour permettre une analyse détaillée de la situation, et que l'hypothèse de la stationnarité sur cette durée est critiquable.

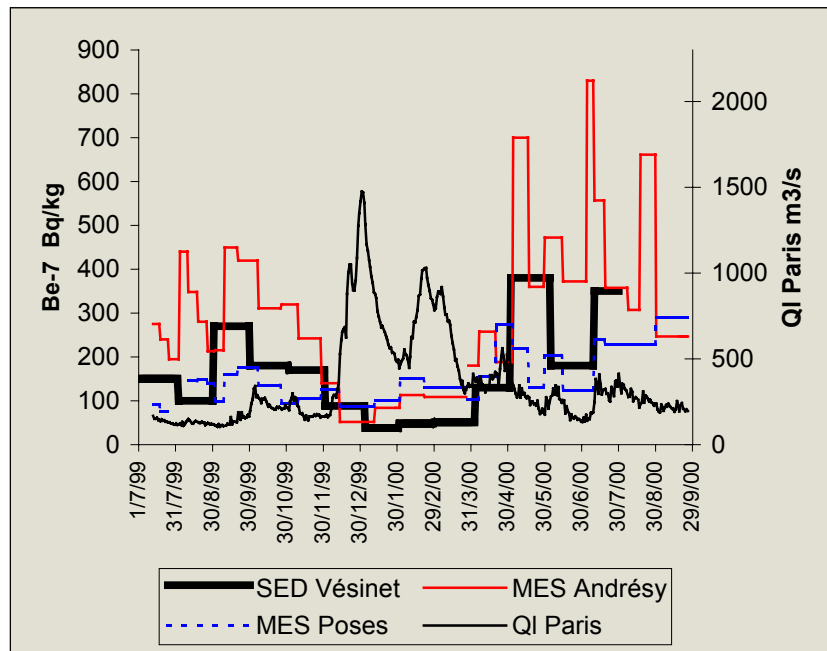


Figure 7. Concentrations en ^7Be dans les particules des pièges à sédiment.

4. Résultats

4.1. Evolution de la concentrations des traceurs

Si la Fig. 7 met bien en évidence les différences de concentrations en ^7Be entre l'amont et l'aval, il n'en est pas de même pour le $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$ (Fig. 8). Ce n'est pas un inconvénient pour le modèle puisque le flux entrant inclut aussi sa production additionnelle par l'uranium dissous, ce qui n'apparaît pas sur la figure.

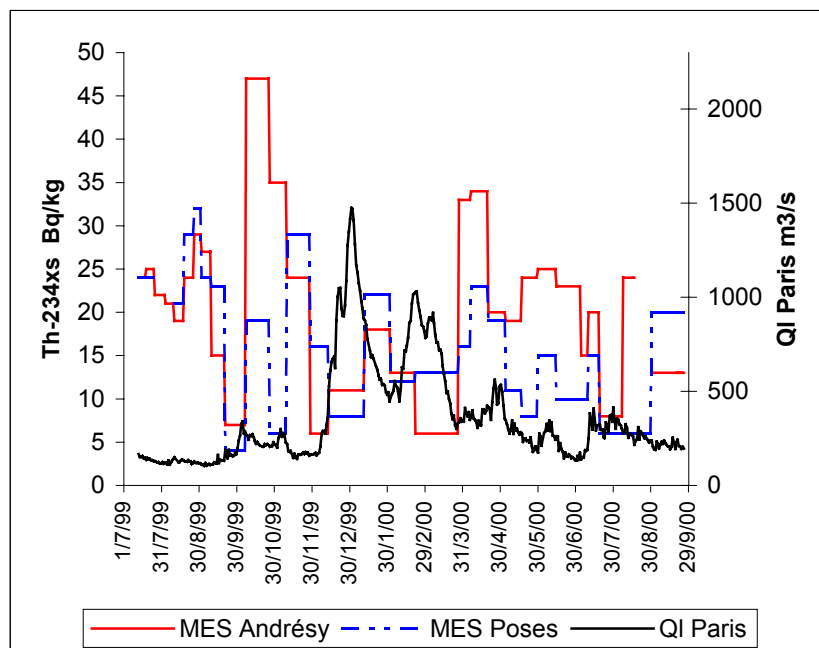


Figure 8. Concentrations en $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$ dans les particules des pièges à sédiment. (Il n'y a pas de données pour les sédiments).

4.2. Masses de particules

La Fig. 9 montre les résultats obtenus pour chaque échantillon avec les deux traceurs (sans correction pour les dépôts nets de sédiments après les crues hivernales). La masse des MES croît assez régulièrement avec le débit, d'environ 2 kt en étiage à 24 kt lors du maximum de la crue hivernale ($QI = 1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Il est manifeste que, pour les débits faibles à moyens, le stock total de particules (MES + PFM) est très supérieur (20 à 300 kt). Lors des crues d'hiver (éch. 14 à 18), aucune estimation fiable ne peut être donnée par le ^7Be car les flux de sortie sont supérieurs aux entrées. Il en est de même pour les résultats par le $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$ lors de la première crue hivernale, qui donne un résultat négatif (éch. 15) ou aberrant (éch. 16 : 300 t), mais les 2 résultats de la deuxième crue, moins forte, paraissent crédibles (éch. 17 et 18) et suggèrent une évolution qui amènerait au maximum de la première crue à une masse comparable à celle des MES (éch. 15), en raison de l'homogénéisation du stock sédimentaire signalée plus haut. C'est donc pour des débits de l'ordre de $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ que le stock particulaire total serait le plus important.

Les masses calculées par le ^7Be sont en moyenne 2 fois supérieures à celles calculées par le $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$, mais les deux estimations sont nettement covariantes. Il existe donc une source d'erreur systématique. A priori, la plus grande insolubilité du thorium en ferait le meilleur traceur des particules, mais l'incertitude sur l'uranium dissous pèse sur les résultats. Par exemple, une concentration 2 fois supérieure amènerait presque à doubler les masses obtenues, d'où un bon accord avec les résultats par le ^7Be . Cette hypothèse n'est pas du tout irréaliste et va être examinée d'ici peu.

Ces stocks de particules sont-ils crédibles ? Répandus uniformément sur la surface du bief ($3 \cdot 10^7 \text{ m}^2$), une masse de 20-300 kt ne représente qu'une accumulation de 0.6 à 8 mm d'épaisseur (avec une densité de 1.2 t m^{-3}), qui est sous cet angle dérisoire. Il est clair qu'une telle accumulation est quasiment inobservable, sauf peut-être très localement s'il existe des zones privilégiées de rétention (le long des berges ?).

Les résultats précédents ne tiennent pas compte des stockages internes de sédiment qui suivent les crues hivernales (périodes 4 et 5 de la Fig. 3). En supposant que les concentrations de traceurs dans ces sédiments retenus sont égales à celles des apports de MES, on obtient des masses plus faibles de 30-50 % (^7Be) ou de 20-30 % ($^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$) pour les débits de $400\text{-}600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ce qui ne perturbe pas beaucoup le schéma général.

4.3. Temps de résidence des particules

Ils sont reportés sur la Fig. 10. Évidemment, le temps de résidence des particules est généralement beaucoup plus long que celui de l'eau, qui décroît de 8 jours en étiage à 1.5 jours au maximum de la crue d'hiver. Pour les particules (résultats par le ^7Be), on obtient 2 à 10 mois pour l'étiage 1999, et environ 4 à 12 mois en débits moyens. Ces valeurs élevées résultent de la grande quantité de PFM dans le bief. Puisque le stock particulaire total tend vers le stock des MES lors des grandes crues, le temps de résidence tend dans ce cas vers celui de l'eau, soit quelques jours seulement.

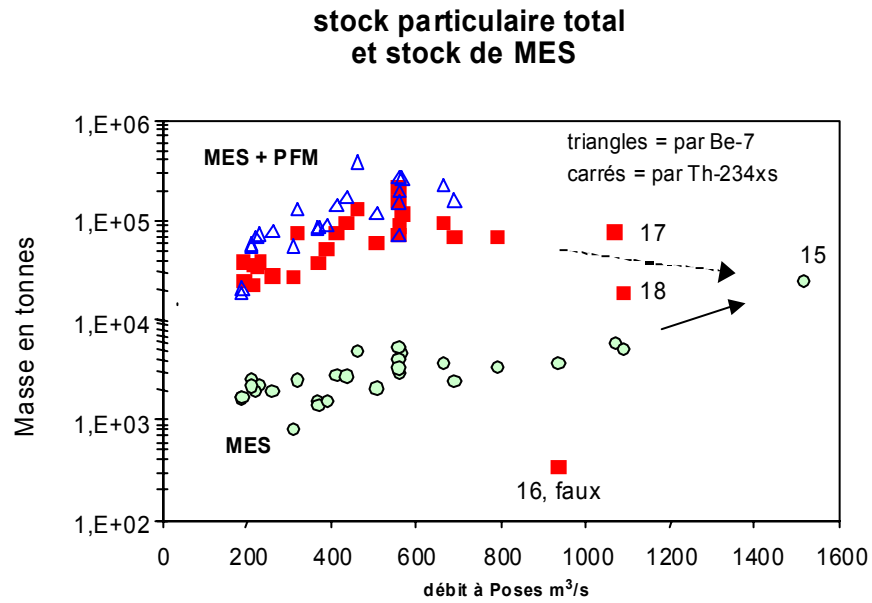


Figure 9. Masses sédimentaires totales (MES + PFM) calculées par le $^{234}\text{Th}_{xs}$ et le ^7Be .

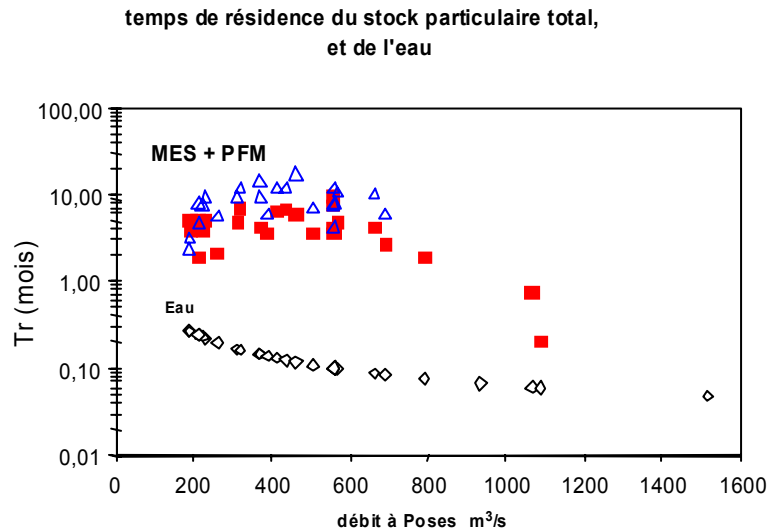


Figure 10. Temps de résidence. Mêmes symboles que la Fig. 9.

4.4. Évolutions chronologiques

Pour mieux décrire les échanges sédimentaires, examinons les variations des MES et des PFM au cours du temps. La Fig. 11 montre l'évolution des MES. Pauvre en étiage, ce stock n'augmente pas avec les débits moyens de l'automne. Lors de la remise en suspension de la première crue d'hiver (éch. 15), on atteint 24 000 t, tandis que lors de la deuxième crue l'augmentation est minime. Puis le stock augmente durant la période 5 alors que le bief fait une rétention nette des apports amont.

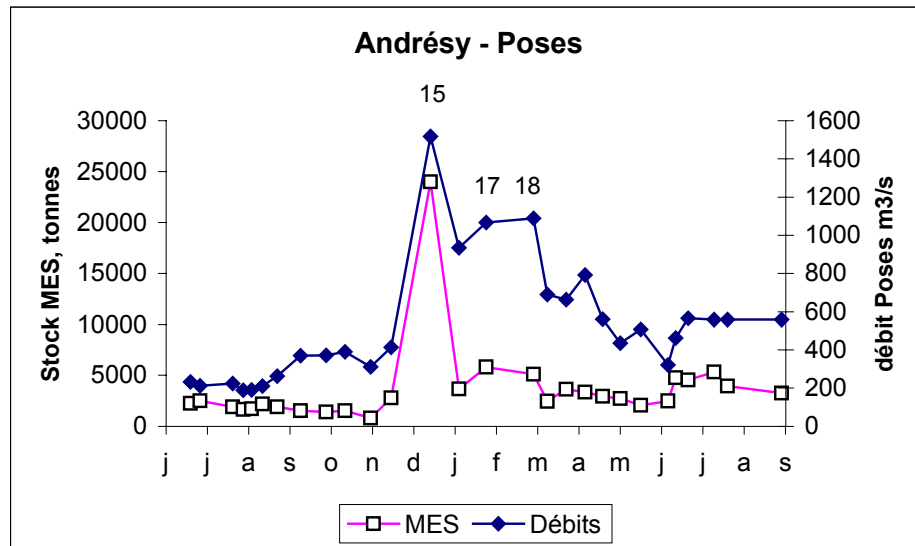


Figure 11. *Évolution du stock de MES.*

Le rapport PFM/MES (Fig. 12) double entre la période 1 (bilan sédimentaire équilibré) et la période 2 (légère érosion nette). Il est présumé proche de zéro lors de la première crue (éch. 15), et reste faible lors de la deuxième crue (éch. 17 et 18). Puis il remonte rapidement, ce qui indique la reconstitution rapide des PFM, en quelques semaines, une fois les crues passées. Finalement, les plus grandes proportions de PFM correspondent surtout aux périodes où le système fluvial n'évacue qu'incomplètement les apports sédimentaires amont, ce qui est logique.

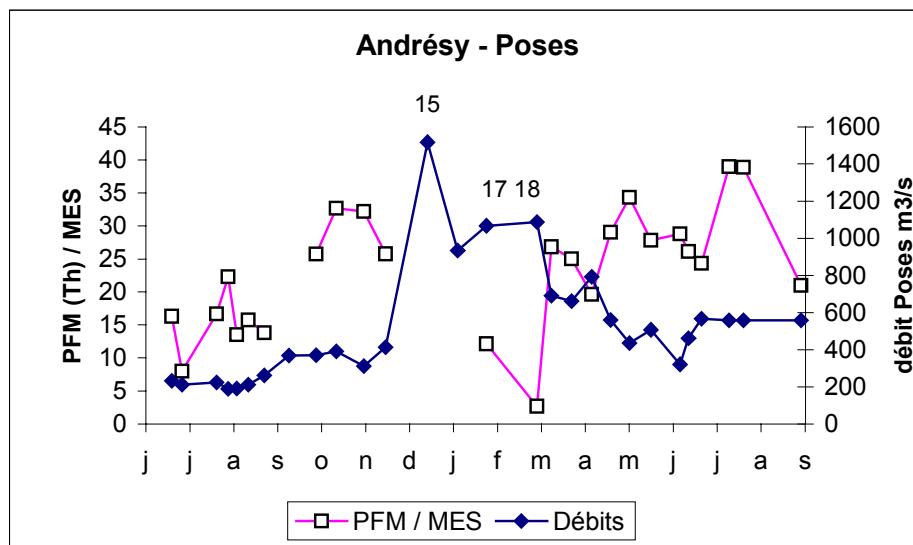


Figure 12. *Évolution du rapport PFM / MES (d'après les masses déterminées par le $^{234}Th_{xs}$).*

Les temps de résidence moyens des particules durant les 5 périodes de cette étude (Tab. 1) sont tous longs (6 – 11 mois par le 7Be), mais pour des raisons différentes. Durant l'été 1999 (période 1), ce temps est long à cause de la faible dynamique sédimentaire (seulement 15 kt expulsés à Poses). Pour les débits moyens (période 2), le temps de résidence ne change pas beaucoup car, bien que la sortie à Poses ait augmenté (28 kt), le stock de PFM a aussi augmenté; c'est à peu près la même chose après les crues d'hiver. Donc en dehors des crues, le système se régule pour conserver des particules d'un âge moyen élevé (0.5 – 1 an) malgré les variations du débit solide.

Le cas des crues importantes est différent. La première crue d'hiver expulse rapidement les dépôts antérieurs, mais de surcroît produit une forte érosion de dépôts plus anciens. Si le temps de résidence est vraisemblablement très bref (jours), le matériel expulsé, lui, est ancien (années ?). Il n'y a que lors de la deuxième crue d'hiver que les temps de résidence sont courts (1 – 3 semaines, éch. 17 et 18) avec des flux de MES amont et aval équilibrés; dans ce cas, les particules qui sortent à Poses paraissent "fraîches".

Le bilan de ce cycle hydrologique est que, la plupart du temps, l'estuaire n'a reçu de la Seine que des sédiments introduits dans le bief Andrézy – Poses depuis des mois, voire des années.

5. Conclusions

La méthodologie de traçage radioactif, esquissée en 1999, a fait depuis ses preuves sur un cycle annuel. Bien que la discordance d'un facteur 2 entre les évaluations des masses de particules par le ^7Be et le $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$ demande à être réexaminée, il est très remarquable qu'on n'observe qu'une différence aussi minime en mettant en jeu des traceurs d'origine et de comportement géochimique aussi dissemblables. La méthodologie proposée s'en trouve incontestablement validée.

Quoi qu'il en soit, la conclusion majeure est que le stock de particules chimiquement "réactives", c'est à dire la somme des MES traditionnelles et des particules facilement remobilisables "invisibles" (les PFM) est supérieur d'un à deux ordres de grandeur à la masse des MES qui sert communément de base aux études d'accumulation et de transport des polluants à forte affinité particulaire. Et, somme toute, il n'y a là rien que de très évident : comment imaginer que beaucoup de polluants transportés par l'eau n'interagissent pas avec les fines couches sédimentaires plus ou moins provisoirement déposées ici et là, et qu'aucune méthode de carottage ne permet de prélever en milieu fluvial de façon crédible ?

En ce qui concerne les temps de résidence des stocks sédimentaires totaux, il est apparu que le tronçon final de la Seine à l'aval de Paris fonctionnait, pour diverses raisons, comme une machine à "vieillir" les apports sédimentaires à l'estuaire. Ce constat, limité à la période d'étude, n'est pas nécessairement généralisable à long terme. Il a cependant des implications potentielles vis à vis de la qualité des flux de polluants sortants. La première est qu'un séjour de plusieurs mois entre Paris et Poses constitue probablement une durée longue par rapport aux cinétiques de dégradation de certains polluants ou de la matière qui les transporte. Sous cet angle, le bief à l'aval de Paris pourrait se comporter comme un "réacteur" biogéochimique capable de modifier les fractions anthropiques labiles des éléments-trace, ou de certains composés artificiels. Ces perspectives, bien à l'aval de cette étude, mériteraient quelque attention, par exemple vis à vis des processus estuariens. Un autre aspect de la question est le risque manifeste de décalage temporel entre les apports de polluants à l'amont et leur sortie à l'aval, qui peut biaiser l'interprétation des flux de polluants, tout au moins sur une échelle annuelle.

6. Références

Ph. Bonté et al. Temps de transit des particules dans le réseau hydrographique : l'apport des traceurs isotopiques "naturels". PIREN-Seine, Rapport d'activité 1999, p. 6-56 - 6-76, 2000.

Ph. Bonté, J.M. Mouchel, A.J. Thomas, M.F. Le Cloarec, J.P. Dumoulin, S. Sogon & L. Tessier. Buffering of suspended sediment transport in lowland river : quantification in river Seine using environmental radionuclides. Acta Geologica Hispanica, v. 35, n° 3-4, p. 339-355, 2000.

OPRI. Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants, Le Vésinet . Tableaux mensuels des mesures.

Remerciements

Nous remercions Mr. A. Ficht du SNS à Rouen et la Lyonnaise des Eaux qui nous ont communiqué les mesures de turbidité et de MES nécessaires à cette étude.

Table 1. Périodes d'échantillonnage et bilan des résultats. Pour la période 3, les masses sont en réalité celles des MES.

début	fin	n jours	échantillons période	Poses QI moyen m ³ /s	Débits solides par période				Résultats (par Th-234xs)			Résultats (par Be-7)			masses MES kt	temps résid. eau jours
					Qs Amont kt	Qs Poses kt	Qs - Qs Poses kt	Qs Amont Poses kt	masse totale kt	temps résid. mois	masse totale /MES	masse totale kt	temps résid. mois	masse totale /MES		
01/01/99	17/02/99			840	151	169	-18									
18/02/99	14/04/99			1163	323	422	-99									
15/04/99	08/05/99			471	55	68	-13									
09/05/99	12/07/99			351	76	27	49									
13/07/99	10/09/99	59	1 - 8	203	16	15	1	32	4,0	16	67	7,9	31	2,0	7,6	
10/09/99	29/11/99	80	9 - 13	345	20	28	-8	43	4,0	31	81	7,6	58	1,4	4,6	
29/11/99	28/03/00	120	14 - 18	1077	472	911	-440	(24)	(0,05)	(1)	-	-	-	10,4	1,8	
28/03/00	15/06/00	79	19 - 24	606	101	65	37	76	3,0	25	146	5,9	49	3,0	2,8	
15/06/00	27/09/00	104	25 - 31	434	141	54	88	106	6,6	30	173	10,9	41	3,5	3,8	