

Transfert des MES à l'aval de Paris

Jean-Marie Mouchel (CEREVE-ENPC, Champs sur Marne)

Philippe Bonté (LSCE, Gif sur Yvette)

Le transport des MES est un des phénomènes physiques de base qu'il convient de connaître pour comprendre et prédire de transport de nombreux polluants. Au même titre que l'eau, les MES sont un vecteur de pollution et d'éléments chimiques en général, il est donc important de connaître leurs flux, leurs temps de séjour et leurs origines.

Les travaux passés menés dans le cadre du PIREN-Seine et d'autres études (Cossa et al., 1984) ont montré que le temps de transit des particules dans les axes fluviaux n'était pas négligeable. Une des traductions de ce phénomène en termes de concentrations de polluants sur les particules apparaît au moment des crues, en particulier des débuts de crue. En effet, le stock de particules déposées au fond de la rivière, et qui s'est chargé en pollution tout au long de l'étiage est remis en suspension. D'une manière générale, dès lors que le flux mesuré en crue dépasse la somme du flux naturel dû au bruit de fond des particules issues de l'amont additionné du flux mesuré en étiage, un phénomène de stockage partiel dans le lit suivi d'une re-mobilisation est mis en évidence.

Estèbe (Estèbe, 1996, Estèbe et al., 1998) a bien mis en évidence ce type de phénomène au niveau de Chatou, à l'aval des principaux rejets urbains de temps de pluie, mais à l'amont du rejet de la station "Seine-Aval". Les particules chargées en zinc se déposent après les rejets de temps de pluie et ne franchissent pas immédiatement le niveau de la station de Chatou. Plus tard dans la saison, au moment des premières augmentations de débit, la charge en suspensions augmente beaucoup dans la rivière mais les particules transportées portent toujours des teneurs en zinc équivalentes aux teneurs mesurées au cours de l'étiage ("petite crue" de septembre 1993, 300 m³/s). Ceci témoigne de leur appartenance à un même stock, stock qui comprend des particules issues des rejets de temps de pluie (voire de quelques fuites du réseau en temps sec) mélangées à des particules autochtones et apportées de l'amont. C'est ce même stock qui est transporté avec un flux beaucoup plus fort au cours de la première crue, ce qui démontre l'importance de l'effet de stockage. Un bilan montre que les quantités de zinc d'origine urbaine transportées au cours des cinq premiers jours de cette première crue sont équivalentes à 3 mois de flux de zinc particulaire en étiage, c'est considérable. D'autre part, les rapport des teneurs Zn/Pb confirment l'origine parisienne des métaux exportés. Au cours des crues plus importantes suivantes, c'est encore une quantité très importante du zinc produit à l'étiage par l'agglomération qui sera exportée. Ainsi, le bilan de l'impact urbain, pour les métaux en particulier mais aussi pour d'autres polluants fortement associés aux suspensions, ne peut pas être établi sans une bonne connaissance de ces phénomènes de stockage et resuspension.

Le phénomène reste sensible à plus grande échelle comme en témoignent les résultats publiés par Cossa et al. (1984) au cours de l'étude pilote sur les flux de contaminants à Poses. Les teneurs en zinc dans les particules restent élevées tout au long de l'année, malgré les augmentations de débits (liquide et solide) enregistrées au cours des années d'étude. Bien que ces années aient été peu humides, il est tout à fait clair que le flux de zinc particulaire qui transite à Poses en crue, même en faible crue, est nettement supérieur au flux naturel qui serait dû au bruit de fond naturel de zinc dans les particules, auquel s'ajouterait un flux continu venant de la ville, telle qu'on peut le mesurer en étiage. Ceci suggère que le phénomène de stockage/resuspension des particules polluées n'est pas limité au secteur aval des rejets urbains de temps de pluie, mais concerne tout les biefs de la Seine à l'aval de Paris. On peut penser qu'il concerne de même tous les secteurs chenalisés du bassin.

Enfin, étant données les vitesses de chute mesurées à l'étiage, il est clair que des phénomènes doivent être effectifs pour maintenir la teneur en suspension aux valeurs que nous connaissons dans les cours d'eau principaux du bassin. Mesurer l'intensité de ces mécanismes au moment de crues de diverses amplitudes, nous permettra également de mieux positionner l'intensité du phénomène à l'étiage, alors qu'il est plus difficile à déceler parce que compensé par la sédimentation.

Notre objectif est donc de suivre les teneurs en MES dans un tronçon chenalisé au cours d'une ou plusieurs crues, afin de mettre en évidence d'éventuelle dissemblances de l'amont à l'aval, qui témoigneraient de l'existence et de l'intensité de phénomènes de resuspension locaux.

1. Secteur et méthode d'étude

Notre choix s'est porté sur le secteur Andrésy-Poses (figure 1). Il présente de nombreux avantages pour ce travail. Parmi ceux-ci citons :

- Sa longueur (129 km) sans affluent de grande importance. Seule l'Epte vient perturber le système à l'aval du barrage de Méricourt, mais son débit est limité. Son bassin versant amont représente 93% de son bassin versant aval.
- Il demeure très sensible du point de vue de la qualité des eaux, comme en témoignent les multiples projets encore dans les cartons pour l'assainissement de l'agglomération parisienne, et le devenir des suspensions n'est pas neutre vis à vis de cette qualité (ombrage pour le développement du phytoplancton, retard dans le développement de tous les impacts des rejets urbains -voir l'introduction- temps de séjour des nitrifiants que l'on sait par ailleurs mentes à se développer et fort liées aux particules...)
- Les débits et la bathymétrie sont sans doute dans ce secteur les mieux connus de tout le bassin, et l'implantation du Service de la Navigation de la Seine y est forte.

1.1. Prélèvements et analyses

Des échantillons d'un litre sont prélevés journallement en période d'intérêt et deux fois par semaine en dehors de ces périodes par les agents du SNS, éclusiers et barragistes. Les prélèvements ont lieu à l'amont des barrages, les échantillons sont préservés à 4°C durant 1 à 3 semaines selon la fréquence des prélèvements, puis ramenés au laboratoire et filtrés sur des filtres Whatman GF/F préalablement grillés à 550°C. Ces filtres sont destinés à la mesure des MES, du carbone organique particulaire et de l'azote organique particulaire. Ils peuvent également être utilisés pour le dosage de certains métaux sous réserve que les problèmes de contamination (échantillonnage, blanc des filtres) soient faibles et qu'on puisse démontrer que les modifications possibles au cours du stockage puissent être considérées comme mineures.

Un aliquote des échantillons est également préservé pour analyse granulométrique au Coulter Counter après destruction des macroflocs par agitation et sonication légère. Ce protocole est utilisé conjointement dans le programme Seine-Aval, il permet de préserver les "micro-flocs", constituants des "macro-flocs" et beaucoup plus robustes que ces derniers qu'il est illusoire de vouloir analyser au laboratoire.

Au niveau du barrage de Poses, les échantillons sont collectés dans la passe centrale du barrage, à proximité de la sonde de mesure YSI maintenue par le groupe de suivi de la qualité des eaux du SNS à Rouen. Les échantillons sont collectés en surface du haut de la passerelle qui surplombe le barrage.

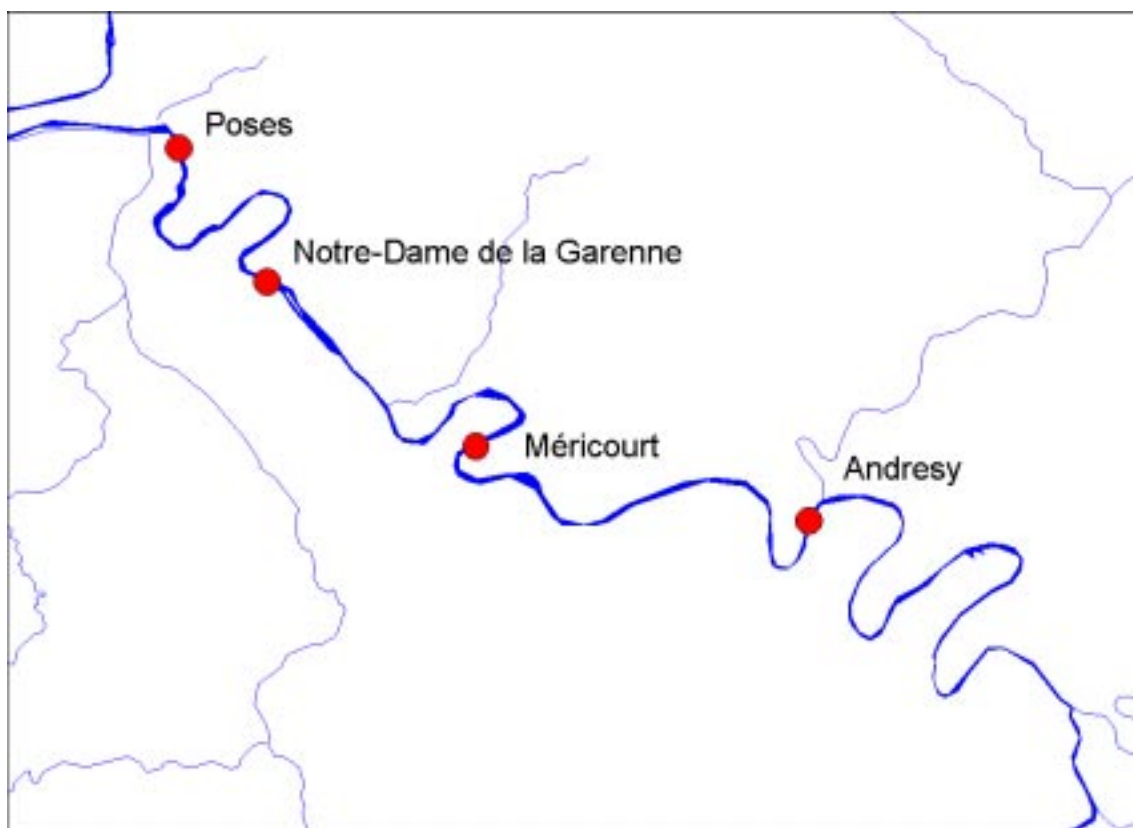


Figure 1. Positionnement des points d'échantillonnage, au niveau des quatre barrages. Les longueurs des tronçons Andrésy-Méricourt, Méricourt-NDLG (Notre-Dame de la Garenne) et NDLG-Poses sont respectivement de 47 km, 41 km et 41 km.

A Notre-Dame de la Garenne, les échantillons sont également normalement collectés en surface depuis du haut de la passerelle, dans la passe n°2, la passe centrale étant souvent en opérée en sous-verse, voire fermée (figure 2). Des travaux sur le barrage nous ont amené à prélever à une dizaine de mètres de la rive gauche à partir du 15 janvier 1999.

A Méricourt, les échantillons sont prélevés à quelques mètres de la rive gauche, en surface, depuis le quai. Des prélèvements comparés au dessus des passes du barrage (difficiles en raison des très fortes vitesses de l'eau) n'ont pas montré de différences significatives des concentrations.

A Andrésy, les prélèvements ont été effectués au seau depuis la passerelle basse du barrage (à 1 mètre seulement au dessus du niveau de l'eau). Le site d'Andrésy présentait plusieurs difficultés qui ont pu être partiellement résolues. D'un part, une certaine inhomogénéité transversale était notable avec un maximum de concentration en rive gauche. La station Seine-Aval étant situé à près de 10 km à l'amont, il nous paraît peu probable qu'elle soit la cause du phénomène. Reste la présence des écluses, éventuellement. Les prélèvements ont donc été effectués dans la passe n°2 (sur trois passes en tout). Par la suite, des travaux ont amené le SNS à fermer la passe n°1 pendant plusieurs mois. Durant ces périodes, Andrésy fonctionnait souvent en sous-verse, alors qu'une partie plus importante du débit transitait par le bras de Denouval.

Nous n'avons pas pu mettre en place de dispositif d'échantillonnage journalier dans le bras de Denouval ou dans l'Oise. Ces stations n'ont pu être échantillonnées que lors des tournées de collecte des échantillons.

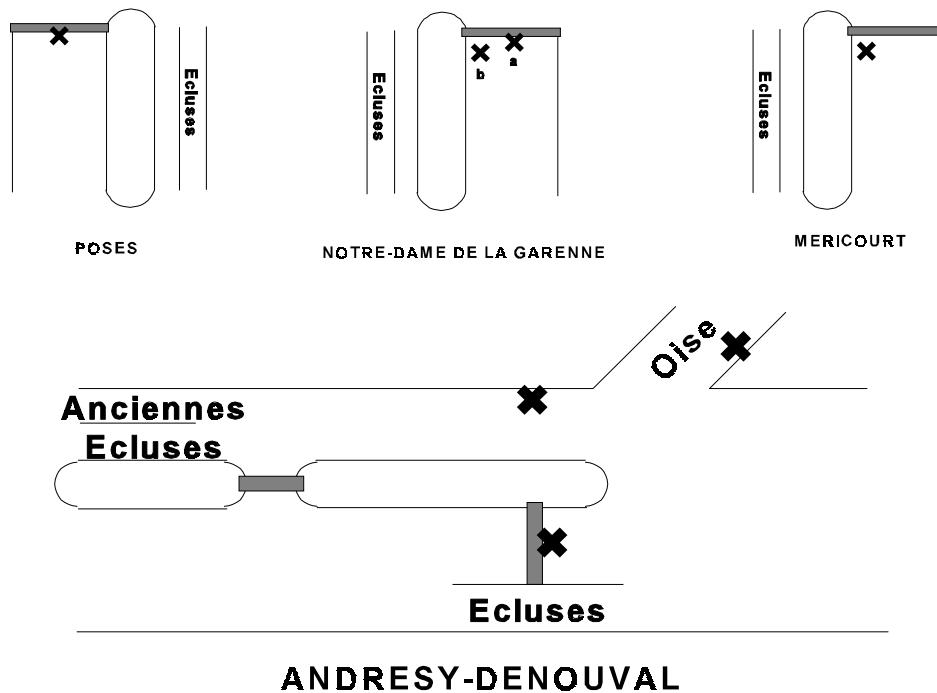


Figure 2. Représentation schématique des points de prélèvement. A Andrésy-Denouval, l'écoulement est partagé entre le barrage d'Andrésy et le barrage de Denouval, dans le bras de Denouval, qui reçoit essentiellement les apports de l'Oise.

1.2. Granulométrie Coulter

Le Coulter Counter mesure successivement le volume des particules passant au travers d'un orifice de dimensions calibrées dans une solution électrolytique. C'est la variation de résistance de l'orifice qui renseigne sur le passage d'une particule de volume donné. De l'ordre de 10000 particules sont traitées au cours d'une analyse. L'appareil que nous utilisons distingue 256 classes.

Les données sont représentées en échelle logarithmique pour les diamètres, d'une part par ce que les données sont acquises au travers d'un amplificateur logarithmique, d'autre part parce que c'est la représentation la plus explicite visuellement. Naturellement les volumes différentiels (dV) sont ramenés au différentiels du logarithme des diamètres, faute de quoi la figure serait incohérente. Un point sur le graphe correspond au volume des particules comprises dans un incrément (en log) de diamètre.

Les données sont traitées par des ajustements de lois log-normales (Brun-Cottan, 1986). Il n'y a pas a priori de raisons physiques bien évidentes pour ce choix, il est simplement convenable. En pratique, les ajustements sont réalisés sur les distribution cumulées, et en séparant l'échantillon en n ($n=20$) classes croissantes de même taille. Travaillant sur 20 classes au lieu de 256, l'ajustement est beaucoup plus rapide et moins sensible à des minima locaux. Ces opérations ont été programmées en R.

2. Résultats obtenus

Au cours de l'automne 98 et du début de l'hiver 99, la Seine nous a gratifiés de faibles pointes de crue, de l'ordre de $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Poses séparées par des débits fluctuants de 400 à $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ces crues sont modestes par rapport aux $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ mesurés au cours des années les plus humides. La figure 3

illustre les débits estimés journalièrement à Paris (Austerlitz) et Creil (Oise), et sommés pour donner une estimation à Poses. Evidemment cette estimation devrait être corrigée pour tenir compte des légères augmentations de débit attribuables au bassin versant local, un (léger) effet de retard dû au transit des débits, ainsi que des prélèvements d'eau et rejets. Elle sera modifiée lorsque les statistiques officielles seront publiées pour toute la période.

La première crue est survenue au tout début du mois de novembre, et repérée par les dates du 23.10 (début de la montée), du 5.11 (pic de débit) et du 16.11 qui marque la fin de la crue et le débit de la période semi-permanente entre 400 et 600 m³.s⁻¹. Les échantillons collectés au cours deux dernières pointes de crue, de faible ampleur également, observées en janvier 1999, n'ont pas encore pu être analysés.

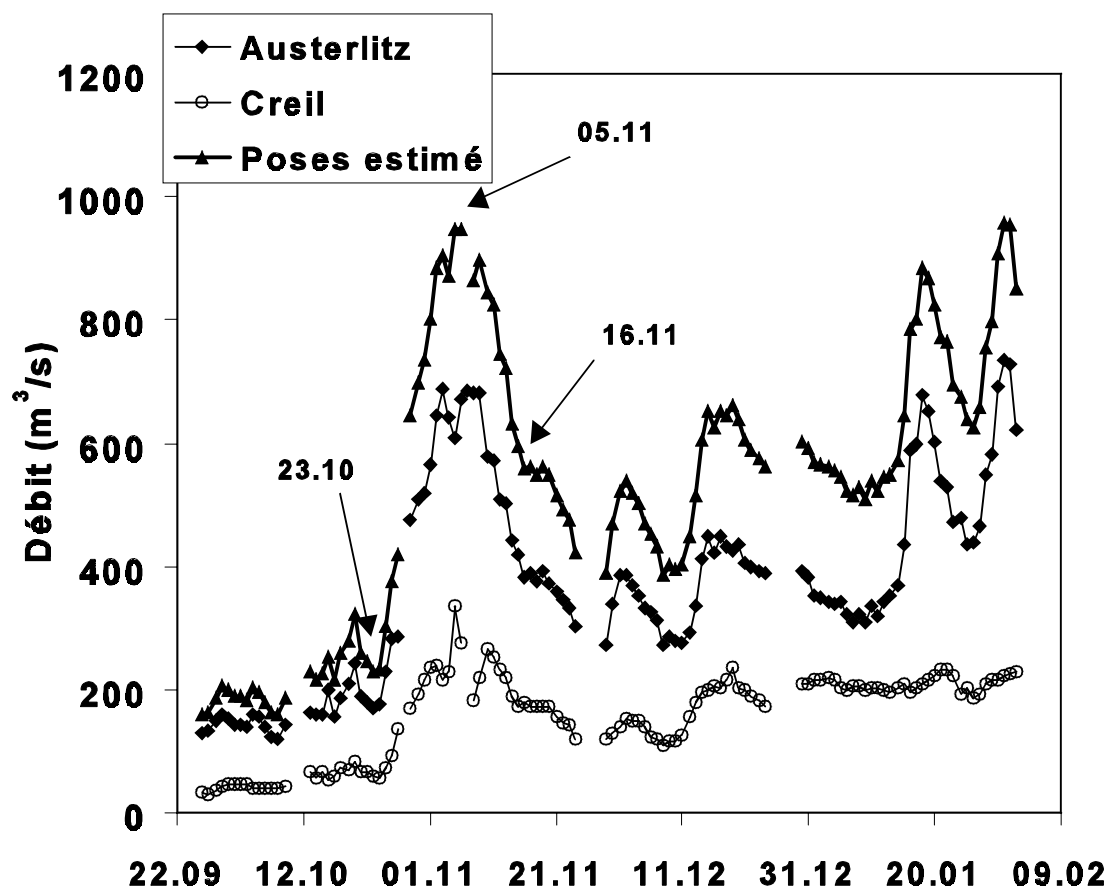


Figure 3. Débits à Austerlitz, Creil et estimés Poses (somme des deux précédents). Source DIREN Ile de France.

2.1. Relations débit-concentration

La pointe de crue provoque une augmentation brutale des teneurs en MES, simultanément en toutes les stations (figure 4). Ces valeurs sont tout à fait conformes, quantitativement, au diagramme proposé par Meybeck et al. (1998) pour la station de Poses pour les montées de crue. Meybeck et al. montrent qu'un régime de type basses eaux avec de faibles teneurs en suspensions, typiquement inférieures à 30 mg.L⁻¹, se maintient jusqu'à des dépôts spécifiques à Poses d'environ 10 L.s⁻¹.km² (soit 700 m³.s⁻¹) ; les teneurs en MES augmentent ensuite rapidement pour atteindre 150 mg.L⁻¹ environ pour un débit de 15 L.s⁻¹.km² (soit environ 1000 m³.s⁻¹). Par contre, nous avons observé pour la descente de crue une relation concentration-débit presque identique (figure 5), alors que la forte crue illustrée par Meybeck et al. montre une hystérésis très marquée avec des teneurs très faibles en descente de crue. L'interprétation qu'on peut

faire de cette différence de comportement réside très probablement dans l'intensité de la crue. En effet, il est plausible que, si la crue la est faible importance comme ce fut le cas en novembre 1998, la totalité du stock érodable n'est pas érodée. Ainsi, le contrôle de la quantité de suspensions transportées reste dépendant de l'hydraulique plus que du stock de MES disponible. Les petites crues de janvier 1999, dont l'analyse est encore en cours apporteront de riches renseignements sur cette question de stocks.

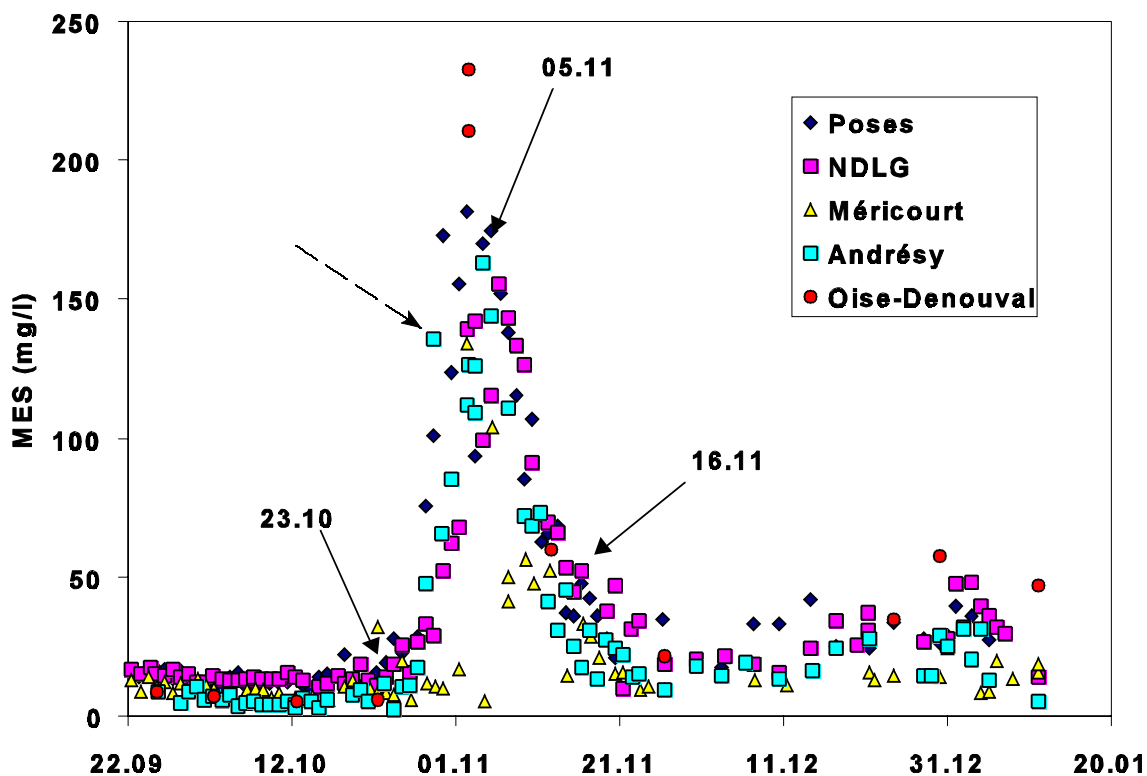


Figure 4. Teneurs en MES à l'amont des barrages d'Andrésy, Méricourt, Notre-Dame de la Garenne (NDLG) et Poses. Quelques points complémentaires dans l'Oise et dans le bras de Denouval sont portés sur la figure..

On observe néanmoins des différences significatives entre les différentes stations, à l'étiage ou en crue.

A l'étiage, les teneurs en MES à Andrésy surtout, mais aussi à Denouval et à Méricourt sont nettement inférieures aux teneurs en MES de NDLG et Poses ; le phénomène est le plus sensible en octobre, alors que les débits sont restés faibles et que l'intensité de tous les processus biologiques commence à ralentir à cause de la température plus faible. Chesterikoff et al. (1998) avaient mentionné une nette diminution des teneurs en MES au passage devant la station d'épuration Seine-Aval malgré l'apport de suspensions par les rejets de la station (données de 1991). Il a été suggéré que le matériel apporté par la station pouvait provoquer une sur-floculation des particules déjà présentes en Seine. De fait, les filtrations réalisées au laboratoire révèlent la présence de nombreuses particules de grande taille à Andrésy, malgré l'effet défloculant du prélèvement et du flaconnage. Les données acquises par le SIAAP en septembre dans le cadre des suivis hebdomadaires à la traversée de l'agglomération parisienne permettent de compléter les informations disponibles pour l'étiage. La diminution des concentrations est effectivement sensible au niveau d'Andrésy (tableau 1). Le fonctionnement détaillé de ce secteur fait l'objet du travail présenté au chapitre suivant de ce rapport.

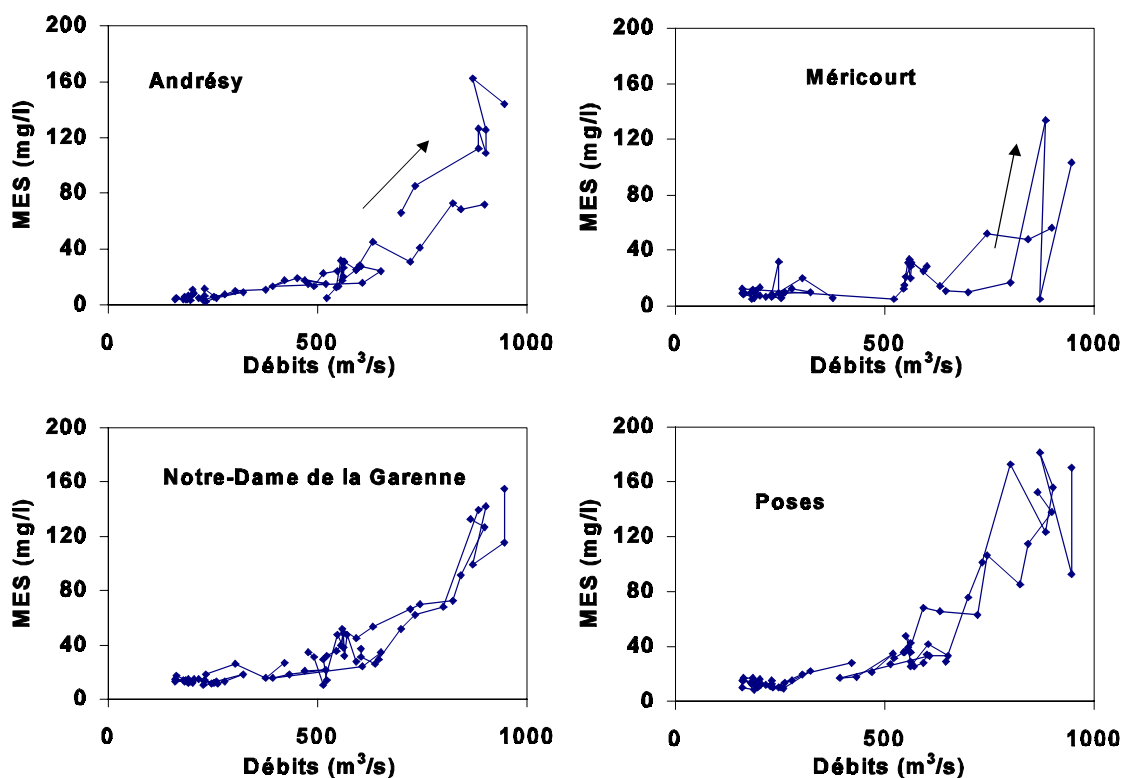


Figure 5. Relations concentration-débit obtenues pour les quatre stations à l'aval de Paris

Tableau 1. Teneurs moyennes en MES mesurées par le SIAAP et par nos soins au cours du mois de septembre 1998. Stage de maîtrise de David Gabard. Les points kilométriques sont conformes à l'échelle du SNS.

Station	Chatou	Sartrouville	Conflans-Seine	Andrésey	Poissy	Méricourt	NDLG	Poses
pK (SNS)	45	59	70	73	78	121	161	202
MES (mg.L ⁻¹)	12.3	11.5	12.5	8.2	10.5	11.3	15.1	14.3

En crue, c'est la station de Méricourt qui se distingue des autres par des teneurs nettement plus faibles que les autres stations, alors qu'à l'étiage les teneurs y sont intermédiaires entre les minima d'Andrésey et les teneurs de NDLG. L'explication de ce phénomène nous échappe aujourd'hui. Ni la configuration du barrage ni largeur de la Seine à l'amont du barrage ne sont très différentes de celles de NDLG notamment, où le même phénomène n'est pas observé.

2.2. Déplacement des MES

Les temps de transit des eaux peuvent être calculés en fonction des débits, au prix d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices qui n'auront guère de conséquences à l'échelle des 24 heures qui séparent chaque prélèvement. Dans les biefs de la Seine à l'aval de sa confluence avec l'Oise, l'évaluation précise des sections mouillées est rendue délicate par la présence de nombreuses îles autour desquelles la bathymétrie de certains bras n'est pas connue avec précision. De plus, elles dépendent également du débit, tendant à augmenter pour les débits les plus élevés. Nous considérons que 1000 m² est une estimation réaliste. Les temps de transit approximatifs entre Andrésey et Poses en fonction du débit sont ainsi portés au tableau 2.

Tableau 2. Temps de transit de l'eau estimés entre Andrésy et Poses

Débit (m ³ .s ⁻¹)	500	600	700	800	900	1000
Temps (j)	3.0	2.5	2.1	1.9	1.7	1.5

A Andrésy, un point à 135 mg.L⁻¹, le 29 octobre est isolé et en avance sur tous les autres, il est marqué par un flèche pointillée sur la figure 4. Pour cet échantillon, la granulométrie est très différente des autres. Etant donné le fonctionnement en sous-verse du barrage à cette époque et le risque d'accumulation de flottants, il est possible que l'échantillonnage ait été perturbé. Aucun dysfonctionnement majeur de la station Seine-Aval n'a été enregistré à cette date, une pluie modérée de la veille avait provoquée une augmentation des débits rejetés de 15 m³.s⁻¹ en pointe. Ce point étant exclu, les données portées sur la figure 5 montrent que les teneurs en MES à Poses au cours de la crue sont à la fois plus élevées que celles des autres stations au cours de la montée de crue (d'une vingtaine de mg.L⁻¹) et que l'accroissement des teneurs en MES y est plus précoce. Au cours de la période de montée de crue, soit du 27 octobre au 3 novembre environ, les débits ayant cru de 500 m³.s⁻¹ à 1000 m³.s⁻¹, les temps de séjour ont décri de 3 à 1.5 jours. Pour évaluer la quantité de particules passées à Poses, et qui sont forcément issues de dépôts dans le lit entre Andrésy et Poses parce qu'elles ne sont pas passées à Andrésy dans la même masse d'eau, il faut comparer les teneurs en MES mesurées à Poses aux teneurs mesurées à Andrésy 1.5 à 3 jours plus tôt, selon le débit. Ceci nous permet d'estimer le stock de particules érodées dans ce secteur au cours de la crue à au moins 13000 tonnes, soit 10% du flux total transporté à Poses au cours de cette crue. Cette quantité est équivalente à trois mois de flux d'étiage à Poses. Bien entendu, cette estimation est une estimation par défaut de la quantité totale issue de dépôts en rivière dans le stock transporté à Poses parce que :

- les dépôts en rivière issus de l'amont d'Andrésy, éventuellement même de la Marne ou de l'Oise n'ont pas été pris en compte,
- une partie des particules apportées à Andrésy a pu être remplacée par des particules issues des dépôts locaux au cours du transit vers Poses, sans que le bilan entrée-sortie auquel nous avons précédé ne puisse les détecter.

Il est probable que le stock de dépôts s'épuisant, les resuspensions au cours des crues suivantes seront d'importance moindre, ce point pourra être vérifié par l'analyse des résultats de la campagne d'échantillonnage encore en cours. A titre de comparaison, rappelons que les flux annuels moyens de MES à Poses tels qu'estimés par Meybeck et al. sont de 700000 tonnes.

2.3. Granulométrie des microflocs

Afin de valider les mesures réalisées au Coulter Counter, il est intéressant de les comparer aux MES totales telles qu'elles sont mesurées sur les filtres. En effet, la fenêtre analytique du Coulter Counter tel que nous l'avons employé allant de 2 µm à 70 µm (gamme de diamètres équivalents, le Coulter mesurant en réalité des volumes), toutes les particules (ou agrégats) de taille inférieure ou supérieure nous ont échappé. La figure 6 montre la relation entre les volumes de particules par volume d'eau et les masses de MES mesurées. La droite figure la densité de 2.5 g.cm⁻³, régulièrement admise pour les suspensions naturelles avec des teneurs limitées en matière organique, c'est cette valeur également qu'a mesurée Bussy (1996) dans les sédiments superficiels de la Seine dans l'agglomération parisienne. Une densité "Coulter" trop faible est expliquée par la présence d'eau en quantité importante à l'intérieur des microflocs ; ce phénomène avait déjà été observée par Maldiney (1994) en condition d'étiage. Une densité calculée trop forte (nettement supérieure à 2.5) signifie au contraire qu'une partie des particules recueillies sur le filtre a échappé à l'analyse Coulter. Evidemment, ces interprétations sont relatives, la combinaison des deux effets pouvant conduire à n'importe quelle densité. La figure 6 montre effectivement une bonne corrélation entre les mesures de MES et les volumes Coulter

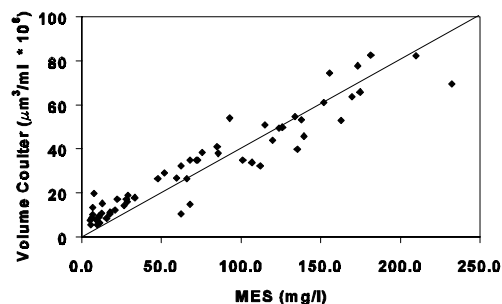


Figure 6. Relation entre volumes Coulter et MES.
La droite correspond à une densité "Coulter" de 2.5

Différentes tentatives ont été faites en ajustant une ou une somme de deux lois log-normales aux mesures Coulter. L'ajustement d'une loi permet de déterminer le mode de la distribution, alors que pour les échantillons collectés, l'ajustement de deux lois log-normale est sur-déterminé (voir figures 10 à 12). Les modes sont les meilleurs indicateurs des distributions observées. Notons qu'un mode bas ne signifie pas forcément que toutes les particules appartiennent à une famille log-normale dont le diamètre médian est bas, mais que la population log-normale dont le diamètre médian est bas est la plus importante.

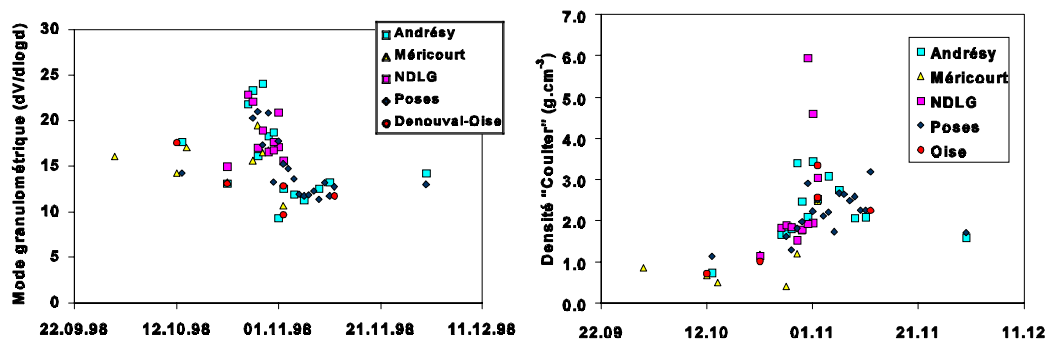


Figure 7. Mode des distributions granulométriques mesurées au Coulter Counter (à gauche), et densités "Coulter" (à droite).

La figure 7 montre l'évolution des modes granulométriques et des densités Coulter au cours de la crue du début novembre 1998. Elle montre clairement plusieurs étapes dans la caractérisation granulométrique des particules. L'étiage correspond à des diamètres modaux de 15 μm environ et des densités Coulter de l'ordre de 1 ; ceci correspond à la situation qu'avait décrite Maldiney dans ce secteur (Maldiney, 1994). Au cours de la phase de montée de crue, les diamètres modaux augmentent jusqu'à 25 μm . Durant cette phase, les densités Coulter augmentent fortement également, jusqu'à des valeurs de 5 à 6. Ceci témoigne probablement de l'apparition de plus grosses particules en grand nombre, il est plausible qu'une partie de ces particules, probablement les plus gros diamètres, a échappé à l'analyse Coulter, d'où la surestimation des densités. Il est probable également que les microflocs, de densité Coulter de l'ordre de 1, ne contribuent que très faiblement à ces échantillons. En pointe de crue et en descente de crue, les particules retrouvent des diamètres plus faibles, entre 10 et 15 μm , mais leurs densités demeurent de l'ordre de 2.5. Pour de tel diamètres modaux, peu de particules ont pu échapper au Coulter, et les densités mesurées indiquent donc qu'il ne s'agit plus de microflocs. En fin, le dernier point, à compléter par les analyses en cours, pourrait indiquer un lent retour vers la situation de pré-crue avec des diamètres modaux de l'ordre de 15 μm et des densités Coulter faibles, qui suggèrent la présence de microflocs.

2.4. Traceurs

Les données de MES et de granulométrie mettent en évidence de façon cohérente des lots de particules de caractéristiques différentes, avant la crue, en montée de crue, et éventuellement après la crue. Les bilans de MES montrent que au moins 13000 tonnes de MES sont issues de resuspensions entre Andrésey et Poses. Plusieurs approches par traceurs sont possibles pour confirmer ces premiers éléments. Un bon traceur doit être significativement différent entre les différents stocks que l'on cherche à identifier. Or, étant donnée la relative unité lithologique des grands sous-bassins qui composent le bassin de la Seine, ces traceurs ne peuvent provenir que de transformations locales des caractéristiques des suspensions : processus biogéochimiques, rejets caractéristiques, radioactivité environnementale. En outre, il y a intérêt à ce que le traceur soit assez facilement mesurable si l'on veut suivre en détail une ou plusieurs crues.

Les traceurs que nous avons d'ores et déjà sélectionnés sont :

- le carbone organique particulaire et l'azote organique particulaire, ainsi que le rapport COP/NOP qui devrait nous permettre de distinguer entre des matières organiques autochtones, éventuellement dégradées et des matières organiques originaires des sols
- le manganèse qui répond très rapidement à plusieurs processus biogéochimiques actifs en Seine : dissolution dans les sédiments, mais aussi précipitation sous forme de carbonates dans certaines conditions encore mal connues dans la colonne d'eau
- le zinc qui est le métal rejeté en plus grandes quantités par l'agglomération parisienne, et qui peut donc caractériser les MES fortement polluées à l'étiage par les rejets urbains. On notera cependant que le zinc est assez mobile également (comme le manganèse) il faudra en tenir compte ultérieurement. En réalité, tous les traceurs précédents doivent être mobiles d'une certaine façon pour être intéressants (sinon ils seraient partout uniformes), il faut seulement espérer qu'ils ne se rééquilibreront pas trop rapidement dans leur nouveau milieu au moment de la crue.

Il existe un moyen très efficace de mesurer la teneur en manganèse d'une masse très faible de sédiment, sans risque de contamination et sans manipulation chimique, c'est l'analyse par activation neutronique. Le seul isotope stable de cet élément, le ^{55}Mn , a une forte section efficace vis à vis des neutrons thermiques (13.3 barn) et se transforme en ^{56}Mn , un émetteur gamma de courte période (2.58 h) aisément détectable. En étroite collaboration avec le laboratoire Pierre Süe (CEA-CNRS, Saclay) qui est parfaitement équipé pour ce type d'analyse, nous avons testé la faisabilité de cette méthode d'analyse sur les filtres quotidiennement prélevés au niveau des barrages aval de Paris.

Les résultats des analyses sont donnés dans le tableau 3.

Les blancs de filtre (filtre Whatman GF/F) sont suffisamment faibles en manganèse pour ne pas gêner la détermination du manganèse porté par les MES. Il est tout à fait possible d'analyser une vingtaine d'échantillons en quelques heures (irradiation de 30 s, comptages de 20 mn pour chaque filtre). Le zinc (par l'intermédiaire de son isotope de courte période ($^{69\text{m}}\text{Zn}$, 13.9 h de période) est également bien visible, mais c'est celui des filtres.

Enfin, une dernière classe de traceurs est constituée des traceurs radioactifs environnementaux, qui évoluent selon un processus de décroissance bien connu, et qui permettent donc des datations. Ils sont développés dans le chapitre suivant.

Tableau 3. *Faisabilité de l'analyse du Mn par activation sur filtre en fibre de verre.*

	Date du prélèvement	poids de MES(mg)	Mn (µg/g)	Mn du filtre
Andresy	02/10/98	4.7	838	195
Andresy	11/10/98	3.7	1153	236
NDLG	25/09/98	11.1	1452	198
NDLG	07/10/98	11.1	1989	211
NDLG	21/10/98	9.0	1589	198
Poses	22/09/98	9.4	1505	197
filtre brut			14	
filtre rincé			14	

3. Une approche plus locale par écho-sondage latéral

En plus des approches par bilan ou par traceur décrites plus haut dans ce texte, il est important de réussir à identifier autant que faire se peut les mécanismes physiques de la resuspension. Cette approche requiert deux types d'informations, à synthétiser *in fine* dans un modèle : il s'agit d'informations cartographiques sur la bathymétrie et la typologie des fonds de la Seine, et de mesures d'érosion et resuspension qui doivent permettre d'évaluer l'intensité de ces processus en fonction des paramètres physiques qui décrivent le milieu. Le secteur aval de la station d'épuration Seine-Aval a été choisi pour cette étude de mécanisme couplée à une modélisation.

Un essai d'utilisation d'un écho-sondeur latéral à été réalisé par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Blois. A la différence d'un écho-sondeur standard qui envoie un faisceau le plus localisé possible vers le fond, un écho-sondeur latéral envoie un faisceau large et planaire pour couvrir une demi-section de rivière latéralement. Deux faisceaux sont envoyés simultanément de chaque coté du bateau pour couvrir toute la section. La figure 8 donne un schéma du principe de mesure, la figure 9 un exemple de résultats obtenus au passage des canaux de rejet de la station d'épuration.

Sous le bateau, le système ne donne aucun écho tant que le fond n'a pas été atteint par les ondes sonores. A proximité du bateau, le signal reçu est perturbé par des échos multiples d'une partie du signal émis par la surface de l'eau, le fond et le bateau lui-même. Ce n'est donc qu'à une distance de l'ordre de deux à trois fois la profondeur que les informations sont directement utilisables. L'intensité des échos reçus au cours du temps, ce qui correspond à des distances de plus en plus longues parcourues par les ondes, dépend à la fois de la nature du fond et de son orientation par rapport à la direction du signal. Comme indiqué sur la figure, à nature du fond constante, un fond localement perpendiculaire au signal donnera un écho fort. Au contraire, à sa suite, on aura souvent une absence totale d'écho due à un effet d'ombrage par la bosse qui a généré l'écho fort. L'écho sondage latéral permet donc de distinguer entre des fonds lisses, très homogènes, et des fonds plus complexes avec des enrochements par exemple. La présence de graviers est également détectable. Les informations reçues ne sont que qualitatives, et relatives à l'environnement immédiat du point qui génère l'écho. En effet, un système d'auto-ajustement du gain d'amplification permet de pallier l'atténuation progressive des échos au fur et à mesure qu'on s'éloigne du bateau, et il n'est pas

possible avec la technologie utilisée de traiter quantitativement les signaux reçus pour déterminer la nature du fond par exemple.

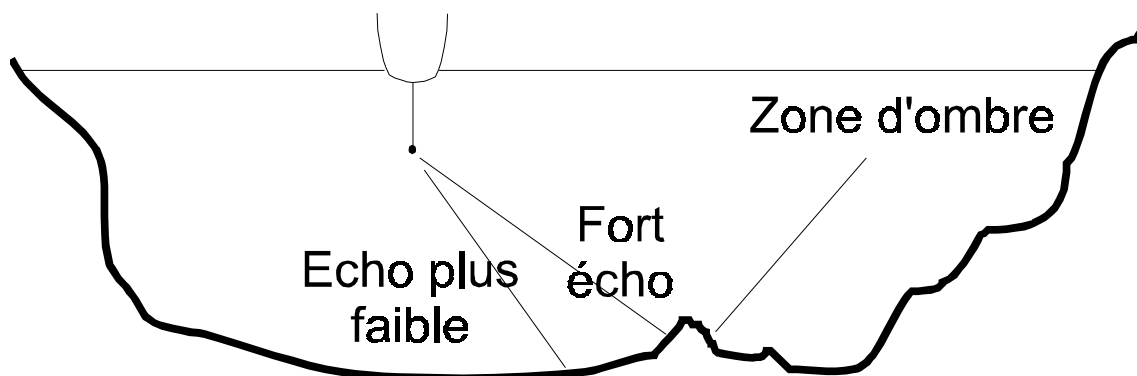


Figure 8. Schéma de principe de l'écho-sondage latéral.

La figure 9 montre la bande centrale sans échos, qui correspond au temps nécessaire aux ondes pour atteindre le fond. A deux fois la distance du bateau au fond, on observe encore une bande d'échos plus forts, peu régulière ; elle est due à un phénomène d'échos multiples. Au delà, les informations sont tout à fait exploitables. Sur la gauche de l'image (en rive droite), la variabilité de l'écho reçu indique un fond grossier, la longueur d'onde caractéristique de ces variabilités peut être interprétée en termes de granulométrie des irrégularités. Au dessus des mots "Fond grossier", on note également des traits qui forment un angle de 10° avec la verticale. Cet ensemble de traits est dû à un mouvement de rotation du bateau, sans doute causé par une vague, qui fait balayer le faisceau de l'écho-sondeur. Sur la droite de l'image (en rive gauche), on distingue tout à fait en haut à droite, légère teinte vert-jaune, la berge d'une des canaux de décharge de la station "Seine-Aval". Plus près du bateau, on distingue une bande très homogène, formée de sédiments fins, sans doute due aux apports de la station par ses autres canaux situés à l'amont. Enfin, entre l'atterrissement et la bord de la rivière, on distingue des séries des bandes sombres, pas exactement parallèles, qui sont probablement dues à un effondrement progressif des berges.

Cette technique fournit des informations extrêmement riches, pour des temps de mise en oeuvre relativement limités : un seul passage pour recueillir toute l'information sur un bief, voire deux ou trois passages décalés pour résoudre le problème de la zone aveugle au centre.. Par contre, le temps à passer au dépouillement des bandes est beaucoup plus long, et l'expérience de l'utilisateur demeure importante pour éviter les fausses interprétations. Cette technique sera appliquée en 1999 à l'ensemble du secteur aval de la station "Seine-Aval" jusqu'aux barrages d'Andrézy et Denouval.

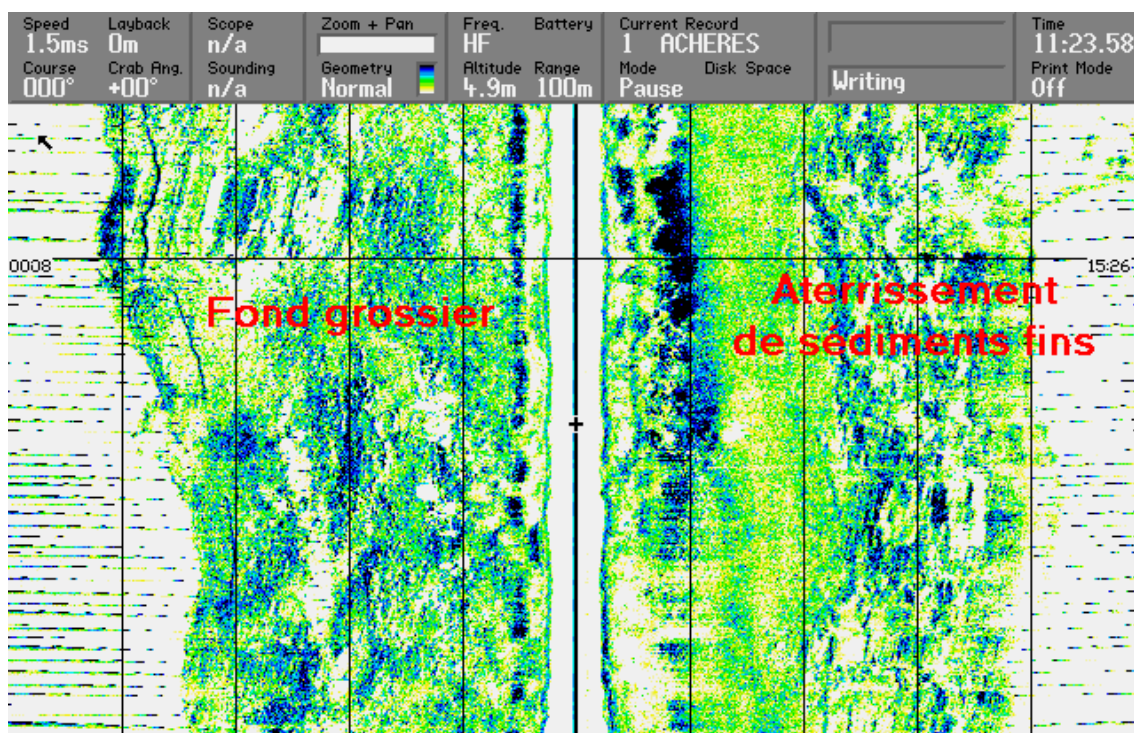


Figure 9. Exemple de résultat d'écho-sondage latéral au niveau d'un des canaux de rejet de la station d'épuration "Seine-Aval".

Remerciements

Nous tenons à remercier tout particulièrement les barragistes et éclusiers du SNS à Andrésy, Méricourt, Notre-Dame de la Garenne et Poses, pour le très important travail d'échantillonnage qu'ils ont accepté de prendre en charge. Le LRPC de Blois a également accepté de tester gracieusement l'écho-sondage latéral en Seine, et de nous initier à l'interprétation de ces données. Nous remercions Jean-Claude Jouanneau et son équipe. Le SIAAP nous a aimablement transmis des données de MES en Seine et des informations sur les déversements à "Seine-Aval"

Références

Brun-Cottan J.C. (1986). Vertical transport of particles in the ocean. In Buat-Ménard P. Ed., *The role of air-sea exchange in geochemical cycling*. pages 83-111. Reidel Pub.

Maldiney M.A. (1994). Caractéristiques physiques des particules en suspension dans un fleuve canalisé, exemple de la Seine. *Thèse de Doctorat de l'Ecole de Ponts et Chaussée*. 348 pages.

Meybeck M., Mouchel J.M., Idlafkih Z., Andreassian V. Et Thibert S. (1998). Transferts d'eau, de matières dissoute et particulaire dans le réseau fluvial. In "La Seine en son Bassin", Meybeck, De Marsily et Fustec Eds, Elsevier. Pages 345-389.

Chesterikoff A., Thévenot D., Mouchel J.M., Poulin M., Garban B. et Ollivon D. (1998). Le fleuve dans la ville. In "La Seine en son Bassin", Meybeck, De Marsily et Fustec Eds, Elsevier. Pages 301-344.

Cossa D., Meyback M., Idrakkih Z. et Bombled B. (1994). Etude pilote des apports en contaminants par la Seine. IFREMER, Agence de l'Eau Seine-Normandie et Ministère de l'Environnement. 151 pages.

Estèbe A. (1996). Impact de l'agglomération parisienne et de ses rejets de temps de pluie sur les concentrations en métaux des matières en suspension et des sédiments en Seine en période estivale. Thèse de l'Université Paris XII-Val de Marne. 237 pages plus annexes.

Bussy A.L. (1996). Mobilité des métaux dans un système fluvial urbain. Thèse de l'Université Paris XII-Val de Marne. 221 pages.

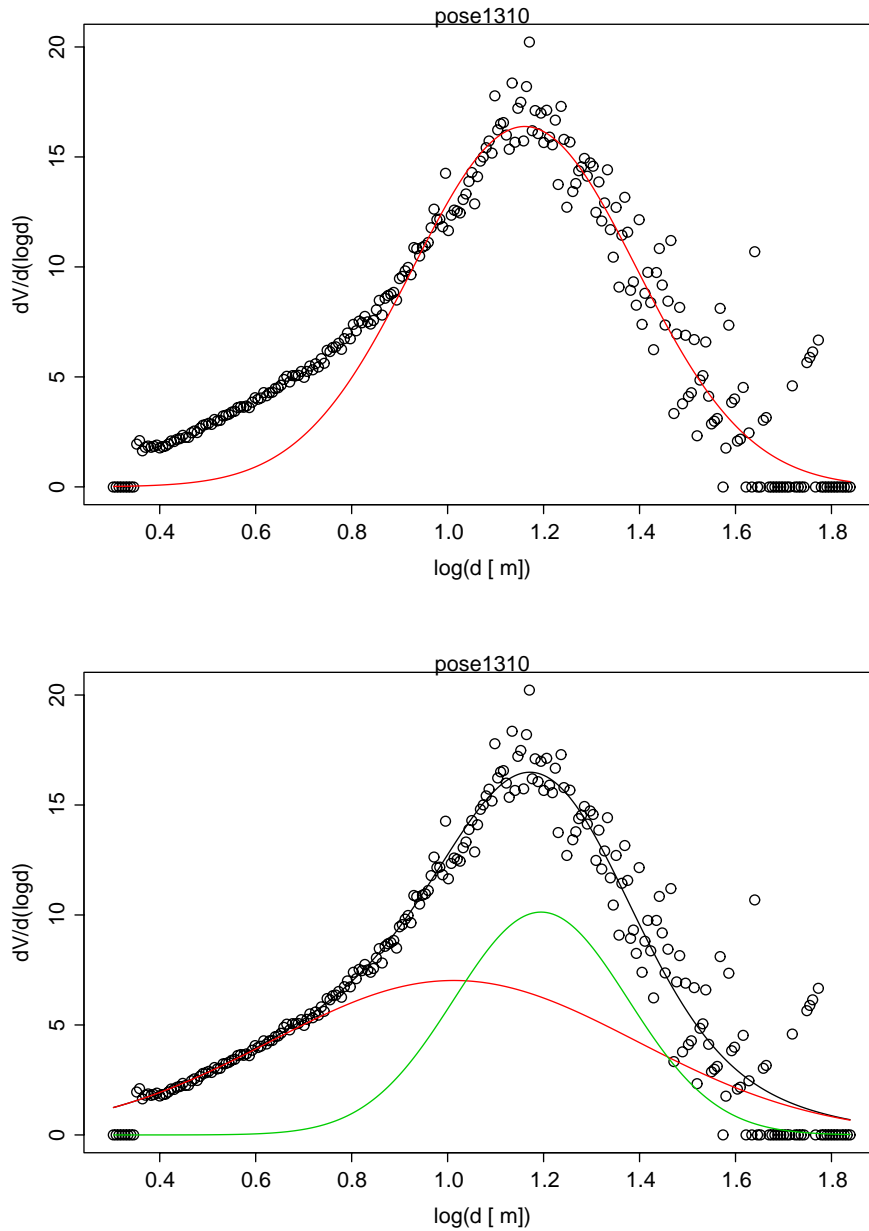


Figure 10. Granulométrie Coulter mesurée dans l'échantillon collecté à Poses le 13.10.98. La figure du haut montre l'ajustement d'une seule loi log-normale, celle du bas l'ajustement d'une somme de deux lois log-normales.

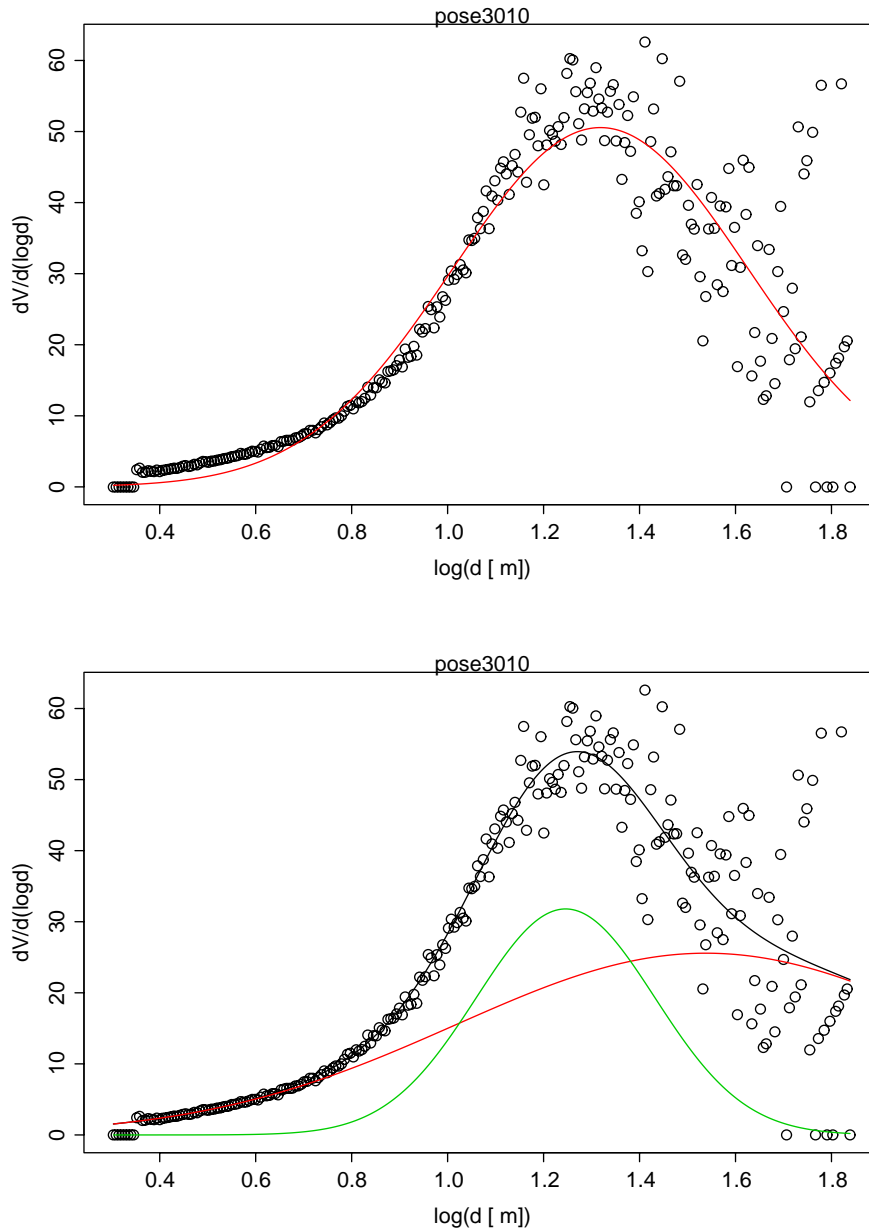


Figure 11. Granulométrie Coulter mesurée dans l'échantillon collecté à Poses le 30.10.98. La figure du haut montre l'ajustement d'une seule loi log-normale, celle du bas l'ajustement d'une somme de deux lois log-normales.

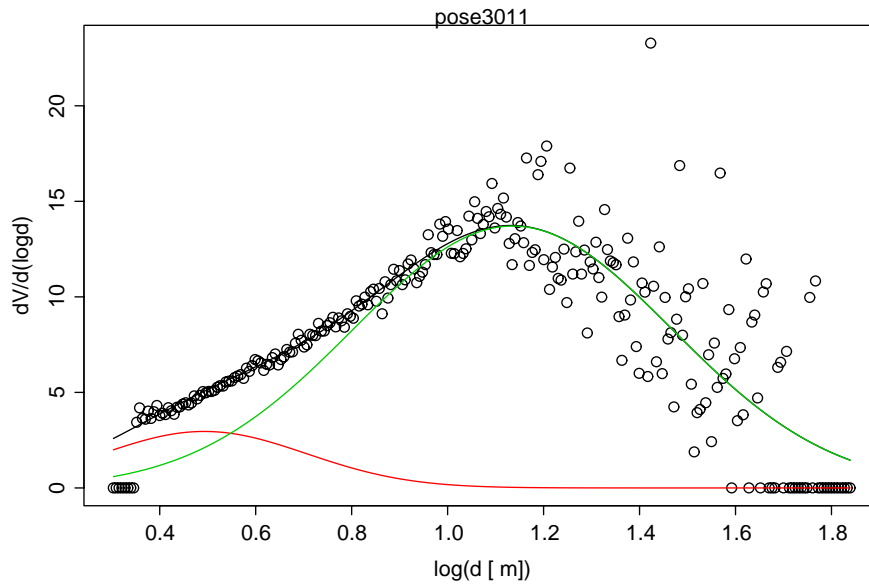
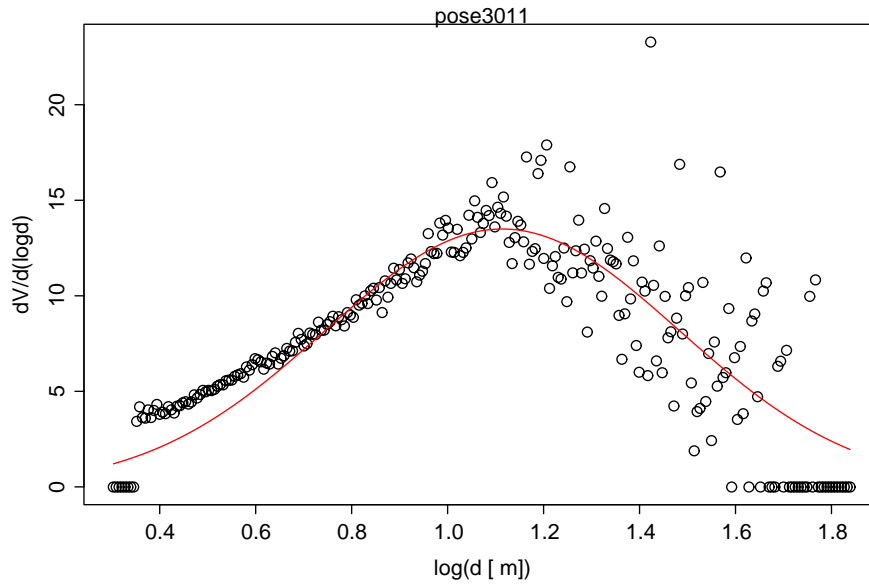


Figure 12. Granulométrie Coulter mesurée dans l'échantillon collecté à Poses le 30.11.98. La figure du haut montre l'ajustement d'une seule loi log-normale, celle du bas l'ajustement d'une somme de deux lois log-normales.

Sommaire  général

Introduction du thème : Particules

Transfert des MES à l'aval de Paris

**La Seine à l'aval de la station d'épuration d'Achères
Modélisation bi-dimensionnelle du comportement hydraulique et
du transport par convection et diffusion**

Marqueurs radioactifs et matières en suspension (+ Annexe)