

Indicateurs de contamination métallique dans le bassin de la Seine : principe et application aux sédiments de crue

Michel MEYBECK (UMR Sisyphe 7619, Université P. et M. Curie, Paris)

Arthur HOROWITZ (U.S. Geological Survey Atlanta, USA)

Alain RAGU (UMR Sisyphe 7619, Université P. et M. Curie, Paris)

Introduction

Le diagnostic et le suivi de la contamination métallique ont beaucoup évolué en France depuis trente ans. S'il y a maintenant un consensus pour abandonner les analyses sur eau brute ou filtrée au profit de l'analyse de la matière particulaire, mousses aquatiques ou particules fluviales, les approches divergent encore quant au nombre de métaux ou de métalloïdes considérés, la nature du matériel échantillonné, les références pré anthropiques qui serviront de base à l'interprétation.

Le suivi sur quatre années d'une dizaine de stations majeures sur le bassin de la Seine (ordres 6 à 8) et de quelques échantillons en milieu périurbain a porté sur l'analyse d'une trentaine d'éléments majeurs et de métaux réalisée en général sur des sédiments de laisses de crue recueillis quelques jours après la descente des eaux (Horowitz et al 1999). Pour tenter de répondre aux questions précédentes plusieurs approches novatrices ont été tentées ici sur cet échantillonnage :

- (i) la détermination de références naturelles pour le bassin, par station, par échantillon,
- (ii) la construction d'indices de contamination basés sur les valeurs théoriques de chaque échantillon et deux indicateurs l'un pour la pollution métallique, basé sur Cd, Cu, Hg, Pb et Zn, l'autre pour la pollution organique basé sur Corg, Ptotal et soufre particulaire, auxquels l'azote particulaire sera adjoint,
- (iii) la comparaison amont - aval de Paris de ces indicateurs sur quatre années,
- (iv) le classement des trente éléments par rapport à l'indicateur de pollution métallique pour chiffrer leur sensibilité à cette pollution,
- (v) l'association de métaux indicateurs d'une contamination urbaine générale.

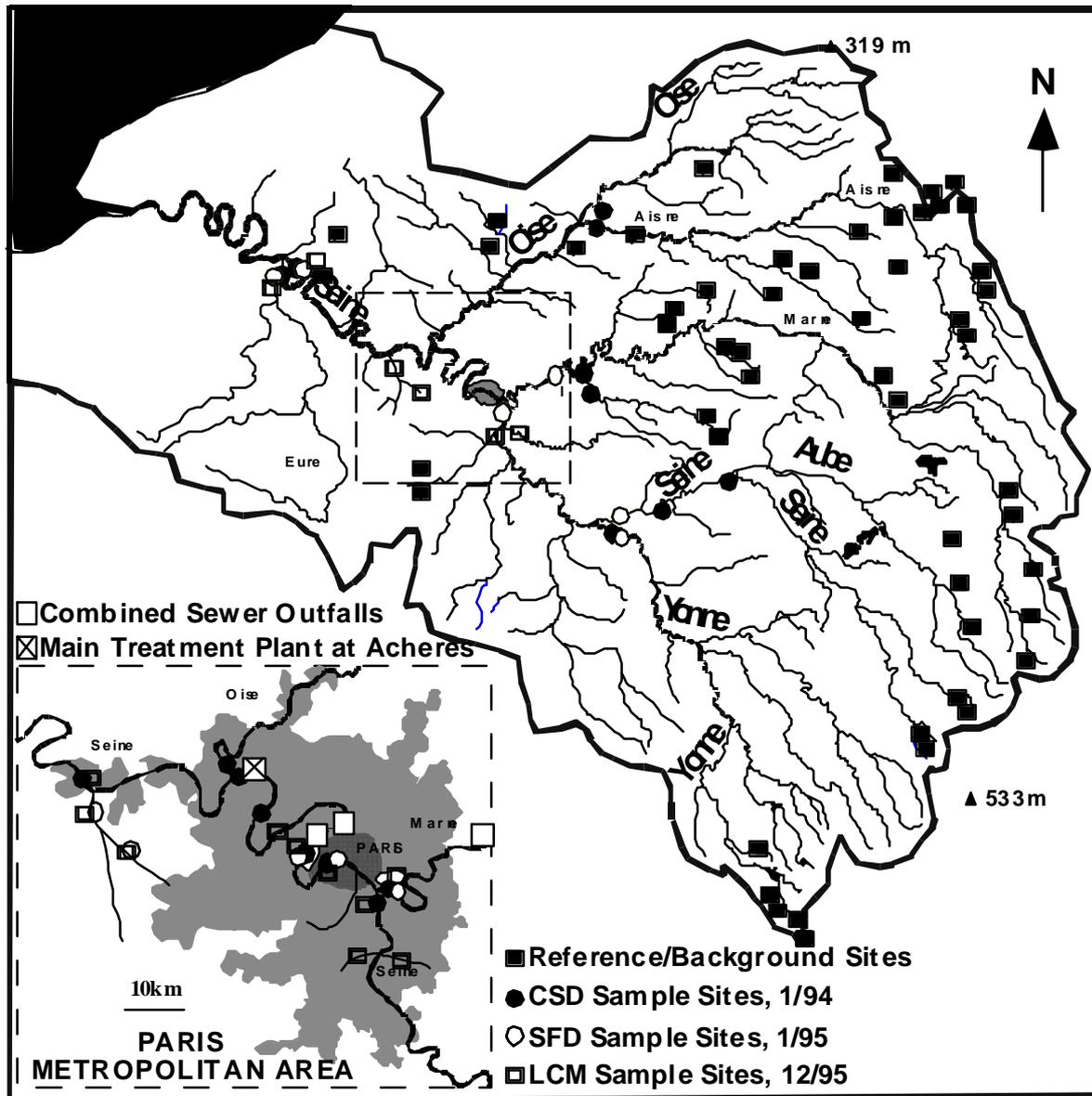
1. Echantillonnage

Plusieurs types de matériaux particuliers d'origine fluviale ont été considérés de façon à obtenir un vaste gradient d'impact anthropique depuis des échantillons de références naturelles jusqu'aux échantillons réputés les plus pollués, en aval de Paris ou dans certains cours d'eau périurbains. Ces échantillons ont été codés par leurs numéros (CSD, SFD, LCM) suivant les campagnes réalisées depuis 1993, puis par leur position par rapport au système Seine (voir tableau 1.1) :

- B pour les échantillons individuels réputés naturels puis dans des ruisseaux forestiers (bassins mono lithologiques) en l'absence de toute contamination directe (Idlafkih, 1998 ; Idlafkih *et al*, 1997).
 - C pour 6 échantillons composites, mélange de 5 à 6 des précédents provenant des mêmes types lithologiques : calcaires, craie, marne et argiles, sable quartzueux, Morvan cristallin.
- Tous les échantillons B et C ont été tamisés à 100 µm avant analyse.
- U pour les échantillons pris en amont de Paris et en dehors de sa périphérie
 - D pour les échantillons pris en aval de Paris et en dehors de sa périphérie (Yerres, Orge, etc...)

- X pour les échantillons particuliers ayant mis en évidence une contamination métallique additionnelle par rapport à la contamination organique relevée (voir figure 3), ils sont souvent caractérisés par des associations inter-élémentaires particulières. C'est le cas particulièrement de l'Eure.

Seine Basin



Carte 1. Carte des échantillons prélevés

Les points représentatifs de ces quatre catégories sont en général identifiés dans la plupart des régressions inter-élémentaires. Deux échantillons de sédiments fins fluviaux âgés de 5000 ans pris lors des fouilles de Bercy, à l'aval du confluent Seine - Marne, par Mme C. Leroyer (CNRS, Lab. Nat. De Préhistoire à Périgueux), ont été aussi analysés et considérés comme référence naturelle.

Les trois quarts des échantillons analysés ici ont été collectés manuellement sur des laisses de crues (Horowitz et al 1999, sous presse) : il s'agit de sédiments fins (sablons fins) soit pris sous l'eau quelques jours après le pic de crue sur des obstacles au courant fluvial ou des banquettes (ponts, escaliers, voies sur berge, lavoirs, rampes d'accès de bateaux, etc...), soit quelques jours après leur exondation aux mêmes sites ou sur des plaines inondables naturelles. La plupart des sites étudiés (Seine à Issy, Puteaux / La Jatte, Mantes, Poses ; Marne à Maison Alfort ; Orge à Savigny ; Yonne à

Monterau,...) ont pu être échantillonnés 2 ou 3 fois, ou plus, de 1993 à Janvier 1998. Toutefois il faut noter que, lors des années sèches, ce type d'échantillonnage ne peut pas toujours être réalisé.

Une autre partie de l'échantillonnage a été réalisée toujours manuellement, dans certains cours d'eau périurbains, pendant l'été. Il s'agit dans la plupart des cas d'échantillons pris sous l'eau (vase fine). Tous les échantillons ont été séchés et lyophilisés avant analyse.

2. Analyse

L'analyse de tous les échantillons après minéralisation complète a été réalisée au laboratoire de l'U.S. Geological Survey d'Atlanta, qui est le laboratoire de référence des USA pour la surveillance des métaux particulière dans les fleuves au niveau fédéral (réseau NASQUA). Le protocole est présenté à l'annexe H.

3. Etablissement des références naturelles de bassin

Le concept même de contamination de l'environnement ne peut se définir que par rapport à un état préexistant aux activités humaines. Pour les métaux particuliers on se réfère généralement au "bruit de fond géochimique". Celui-ci peut varier d'une région à une autre (par exemple terrains sédimentaires vs terrains volcaniques), d'une station à l'autre et d'un échantillon à l'autre lorsque la composition granulométrique et/ou minéralogique varie. Nous avons considéré ces trois échelles.

3.1. Référence du bassin

Son principal avantage est normatif : chaque analyse de matériel particulaire fluvial peut lui être comparé et normé. C'est l'approche suivie par beaucoup d'institutions en charge de la surveillance du milieu. Il y a alors deux risques : si la référence choisie est trop haute certains échantillons, même légèrement contaminés, peuvent rester en dessous de celle-ci ; si elle est trop basse certains échantillons en conditions naturelles pourront être identifiés comme contaminés.

En général on détermine une moyenne pré-anthropique sur le bassin et on l'affecte d'une variation naturelle possible, par exemple de $\pm 30\%$. Sur la Seine nous avons examiné plusieurs approches, dont certaines sont, à notre connaissance, nouvelles (voir tableau 2)

Tableau 1. Localisation et statuts des stations indicateur de pollution métallique (MPI) et organique (OPI), densité de population des bassins (hab/km²).

Sample	River Station	Date	Status	MPIo	OPI	Pop. Dens.
CSD27	Seine Ivry	1994	D	23,8	8,3	105
CSD28	Marne Alfort	1994	D	20,5	10,5	160
CSD29	Yonne Montereau	1994	U	19,2	0,0	27
CSD32	Oise upst. Compiègne	1994	U	22,3	0,0	65
CSD35	Seine Alma	1994	D	25,7	8,6	160
CSD36	Aisne upst. Comp.	1994	U	10,5	16,4	65
CSD36bis	Aisne upst. Comp.	1994	U	1,7	45,8	65
CSD37	Seine Mantes	1994	D	55,0	31,3	240
CSD39	Oise Cergy	1994	D	26,1	28,6	160
CSD40	Seine Conflans	1994	D	49,5	15,3	280
CSD42	Seine Mon Lafitte	1994	D	53,7	18,7	220
CSD43	Seine Jatte	1994	X	76,0	25,2	180
CSD44	Seine Bray	1994	U	8,7	12,3	18
CSD45fines	Marne Esbly	1994	U	10,4	0,0	70
CSD45grossier	Marne Esbly	1994	U	6,6	14,5	70
CSD46	Grand Morin	1994	U	13,5	0,0	130
CSD53	Seine Poses	1994	D	69,6	40,3	240
CSD53bis	Seine Poses	1994	D	61,4	42,1	240
CSD54	Eure Lery	1994	X	139,6	16,9	83
CSD67	Seine Romilly	1994	U	7,0	5,8	18
SFD1	Seine Poses	1995	D	46,0	31,3	240
SFD2	Seine Jatte	1995	D	27,0	8,4	180
SFD3	Marne Alfort	1995	D	20,2	6,0	200
SFD4	Yonne Montereau	1995	U	9,4	3,1	27
SFD5	Eure Lery	1995	X	92,9	21,1	83
SFD6	Seine Ivry	1995	D	22,8	5,3	105

SFD7	Seine Montereau	1995	U	41,7	2,7	18
SFD8	Marne Anet	1995	X	10,8	0,6	75
SFD9	Seine Alma	1995	D	32,5	7,7	160
BER12	Seine paleo Berçy		B	1,4	0,0	0
BER51	Seine paleo Berçy		B	1,8	0,0	0
LCM1	Orge Savigny	1996	D	78,7	81,7	800
LCM2	Seine Croissy	1996	X	53,5	34,7	220
LCM3	Yerres	1996	D	34,1	15,5	230
LCM4	Seine Poses	1996	D	46,1	38,6	240
LCM5	Seine Puteaux	1996	D	29,6	18,7	180
LCM6	Marne Alfort	1996	D	17,0	14,8	160
LCM7	Ru de Gally	1996	D	57,1	70,6	500
LCM8	Meauldre	1996	D	52,9	55,6	422
LCM9	Eure Lery	1996	X	81,5	29,9	83
LCM10	Seine Mantes	1996	D	60,4	38,0	240
LCM11	Seine Corbeil	1996	U	13,6	13,2	44
LCM12	Seine Ivry	1996	D	24,0	13,0	105
EB5	Ref. Stream	1995	B	3,7	0,0	0
EB8	Ref. Stream	1995	B	-0,3	0,0	0
C1	Comp. Limestone	1995	C	-0,2	13,9	1
C2	Comp. Sand/clay	1995	C	0,6	2,2	1
C3	Comp. Qz sand	1995	C	0,8	4,5	1
C4	Comp. Marl	1995	C	1,0	1,8	1
C5	Comp. Chalk	1995	C	-1,6	26,0	1
C6	Comp. Cristall.	1995	C	12,2	2,0	0
LCM23	Seine Croissy	1997	X	58,2	9,2	210
LCM24	Marne Maison Alfort	1997	U	13,4	10,7	160
LCM25	Seine Mantes	1997	D	38,1	20,3	240
LCM26A	Seine (Puteaux)	1997	D	23,2	4,3	180
LCM26B	Seine (Puteaux)	1997	D	23,0	4,0	180
LCM27	Seine Port Neuf	1997	D	32,7	16,7	160
LCM28	Seine Ivry	1997	U	25,7	8,5	105
LCM29	Seine (Puteaux)	1998j	D	32,6	10,4	180
LCM30	Orge Sav	1998j	D	71,5	58,0	800
LCM32	Marne Maison Alfort	1998j	U	14,2	13,8	160
LCM33	Seine Ivry	1998j	U	26,6	9,8	105
LCM34	Yerres	1998j	D	31,5	12,9	227
LCM36	Eure Lery	1998f	X	128,2	19,0	83
LCM37	Seine Poses	1998f	D	37,4	20,7	240
LCM46	Irrawady			-0,5	0,0	0
DME	Ecaillon	1997	U	7,1	1,8	0
DM2	Artoise	1997	B	0,6	0,0	0
DM5	Vesle	1997	D	66,4	96,9	280
DM11	Yvette aval	1997	D	30,0	18,2	300
DM12	Orge Sav	1997	D	100,7	88,6	800

Tableau 2. Références naturelles dans le bassin de la Seine. (Al, Fe, Ti, Ca, Na, Mg, K in % ; autres éléments en $\mu\text{g.g}^{-1}$)

	Ag	Al	As	Ba	Be	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	K	La	Li	Mg	Mn
1							0,34			5							
2	4,55		17; 8		3,1		0,35	4,5	50	12	1,8	0,02		24	82		200; 600
3		3,33		300						24							
4		2,9	7,4	253	0,9	0,23	8,1	40,8	10,4	1,6	0,018				23,4		558
5	-1	3,1	6,5	215	1,16	14	0,18	6,1	37,6	14,9	1,52	-0,036	0,88	22	36	0,317	368
6			5				0,35	7	45	20							
7		2,7	6,8	160	1,5	18,9	0,3*	4	40	23*	1,3	0,06*	0,8	19	41	0,3	380
8						20,7	0,35			15		0,05	1,05			0,4	
9			3,3				0,1	4,2	28,8	7		0,013					
10			5,4				0,22	6,1	46,6	16,6		0,059					
11		4,5	5,0				0,35	5,5	50	15		0,030					

	Na	Ni	P	Pb	PIC	POC	S	Sb	Se	Sr	Ti	V	Zn
1				27									34
2		20,5		24	6,75	1,0;0,3		0,6	0,8;3,8	300	0,22	48	100
3				27									92
4		22,5	702	21,4	3,3	2,6	/	0,5	0,7	231		41,5	62,1
5	0,178	16,5	520	26,1	4,54	1,76	0,07	0,51	0,74	190	0,225	40	52
6		14,5	800	19				0,6	0,8				60
7	0,15	15	650	39*	5,9	1,5	0,05	0,5	0,7	240	0,07	35	94*
8	0,2			25									90
9		8,6	143	10,8				0,32	0,1				25,5
10		26,4	693	16,8				0,53	0,64				69,2
11		17		25									80

1 : Avoine et al, 1986 dépôts estuariens anciens , 2 : moyenne de deux niveaux pré-historiques à Bercy, 3 : médiane de 49 échantillons de ruisseaux sur bassins monolithologiques, 4 : calculé sur la base des % d'affleurements pour 6 types lithologiques à Poses et leur composition moyenne dans des ruisseaux forestiers, 5 : calculé par régression avec l'indice de pollution métallique (MPI), 6 : valeurs choisies par Meybeck 1998, 7 : combinaison Bercy + échantillons les moins contaminés, 8 : valeurs choisie par (Idlafkih et al, 1997), 9 et 10 : valeurs théoriques minimum, (#9) et maximum (#10) basées sur des assemblages minéraux pour 70 échantillons, *valeurs pouvant encore être influencées par les activités humaines 11 : Thévenot et al, 1998.

• Dépôts anciens (analyses 1 et 2)

Les dépôts anciens, repérés ou, même mieux datés sont souvent utilisés. L'analyse 1 (tableau 2) présente les valeurs sur des sédiments estuariens (d'après Avoine et al, 1986), l'analyse 2 présente la moyenne des deux échantillons pris à Bercy. Les deux résultats sont en général très proches et présentent des niveaux très faibles en métaux de la liste noire (Cd, Hg, Pb). On note cependant une divergence en Zn. – sur les dépôts anciens, on fait l'hypothèse implicite d'une absence de changement de composition après le dépôts (diagenèse) et d'une constance des processus naturels d'altération chimique des roches.

• Petits bassins forestiers (analyse 3)

Une cinquantaine de sédiments déposés de petits bassins forestiers, agricoles et ruraux monolithologiques a été analysée. On en présente ici la médiane, assez proche des échantillons de Bercy pour Pb et Zn, mais plus forte pour Cu. Pour ce dernier on pourrait y voir une influence de l'activité agricole puisque l'ensemble des petits bassins a été pris en compte, bassins cultivés compris.

• Valeurs d'expert (analyses 6, 7, 8 et 11)

L'expert se fait une opinion, à un instant donné, sur la base des connaissances existantes. Dans une conférence présentée en Octobre 1996 à Nantes (Meybeck, 1998) nous avons choisi un jeu de valeurs (analyses 6) qui a été légèrement repris depuis en combinant les échantillons de Bercy et les laisses de crues les moins contaminées (EB5 + CSD45C + CSD67 + SFD4) (analyse 7). Une autre estimation prend en compte les valeurs d'Avoine et al (1986), les mesures de Bercy et celles des petits bassins (analyse 8). On mesure ici les petites variations liées à la vision de l'expert au fur et à mesure de son accès à de nouvelles données.

• Concentrations moyennes théoriques par "double pondération" (analyse 4)

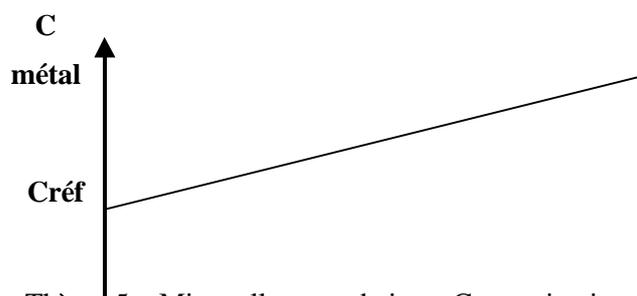
On considère que le bassin est composé de 6 principaux types de roches (tableau 3) : calcaires (analyse C1), mélanges argilo-sableux et remplissage holocène des vallées (analyse C2), sables tertiaire d'âge quartzeux (analyse C3), mélange marno-argileux (analyse C4), craie d'âge secondaire (analyse C5) et terrains cristallins du Morvan (C6). Chaque échantillon représentatif de ces types résulte du mélange à part égale de 5 à 6 échantillons de petits bassins forestiers monolithologiques, analysé à l'USGS à Atlanta dans les mêmes conditions que les échantillons individuels.

Les proportions d'affleurement (α) de ces types de roches sur tout le bassin ont été présentés dans la thèse de S. Thibert (1994). Nous les avons reconsidérées en tenant compte d'une échelle relative d'érodabilité mécanique (β) en attribuant les coefficients suivants à chaque type : 1 pour C1, 3 pour C2, 0,8 pour C3, 4,5 pour C4, 1 pour C5, 0,8 pour C6. Un bassin marno-argileux est donc considéré comme contribuant 5,6 fois plus à la production de particules fluviales qu'un bassin crayeux. Ces proportions sont basées sur une première étude de la distribution statistique des MES analysés dans le RNB de 1991 à 1997 sur 240 stations (Meybeck en cours). Les coefficients (γ) de double pondération (% affleurement x échelle d'érodabilité) sont alors appliqués aux 6 types de roche du bassin pour déterminer la composition théorique moyenne (voir plus loin tableau 3 ; Σ Poses ; et tableau 2, analyse 4).

Comme les matériaux de départ pris sur les bassins forestiers sont des sédiments tamisés à 100 μm , ils peuvent être plus grossiers que l'ensemble des MES de la Seine (médiane vers 30 – 40 μm) et donc un peu moins riches en argiles et/ou minéraux alumino-silicatés fins. L'analyse 4 du tableau 2 reflète ce léger décalage. Il faut noter que cette méthode peut être appliquée à chaque station (voir ci-après).

• Concentrations moyennes théoriques par "extrapolation à pollution nulle"

Cette méthode, comme la précédente, est nouvelle. Nous avons défini un indicateur de pollution métallique (MPI, voir section 4.3) sur la base des teneurs en Cd, C, Hg, Pb et Zn. Malgré un poids relatif de 20 % seulement chaque métal est individuellement bien relié au MPI avec des r^2 supérieurs à 0,8 ou 0,9, si on ne considère pas 10 % des échantillons caractérisés par des contaminations individuelles spécifiques. Lorsque le MPI tend vers 0 (contamination nulle) l'ordonnée à l'origine (Cref) de la relation métal = f (MPI) peut être interprété comme une valeur de référence du bassin (cf schéma ci-joint).



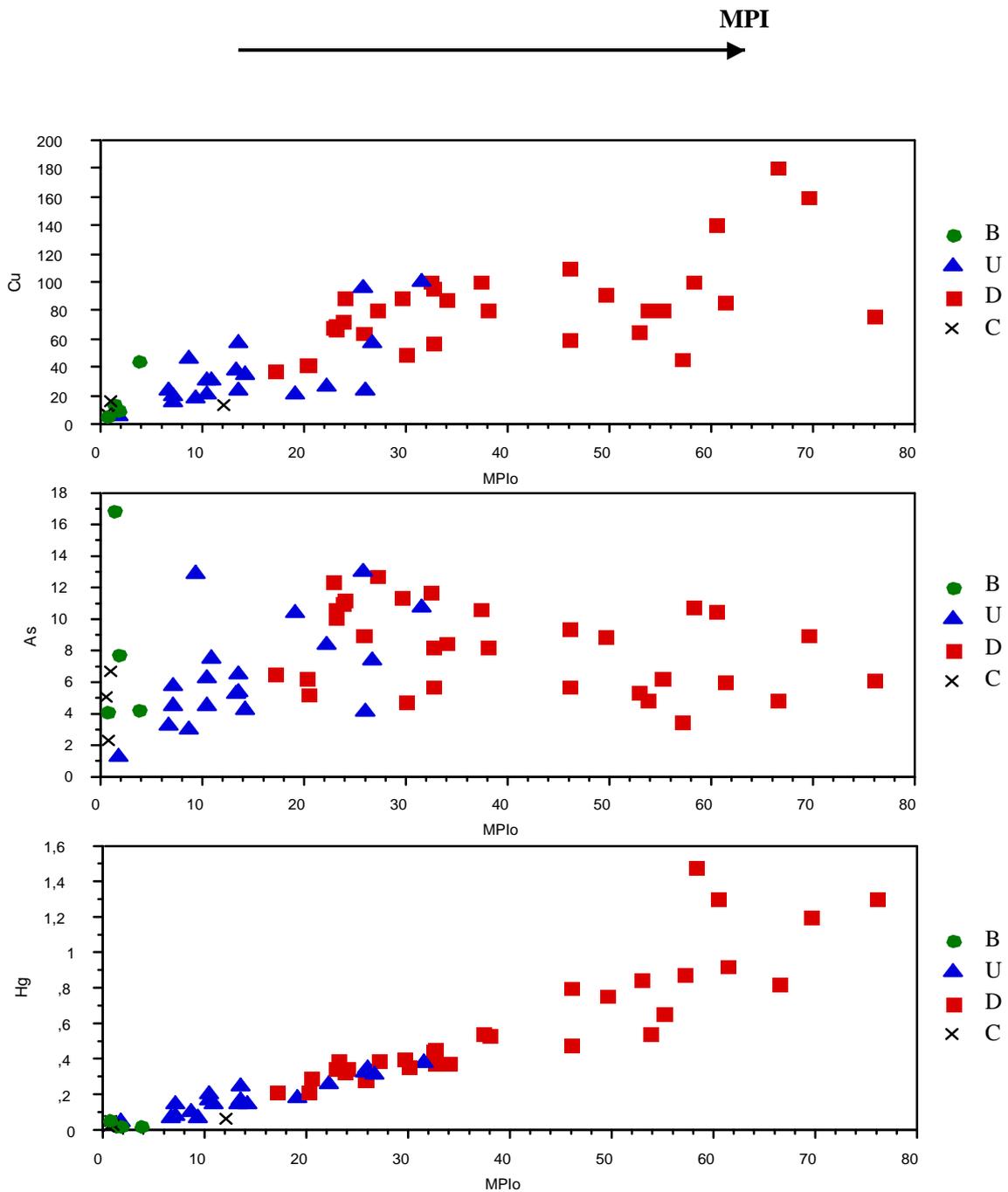


Figure 1. Variation du Cu, As et Hg particulaire en $\mu\text{g.g}^{-1}$ en fonction de l'Indicateur de Pollution Métallique (MPI.)

Cette approche a un grand avantage : elle ne nécessite pas une sélection précise de petits bassins réputés non pollués et peut se pratiquer sur les sédiments déposés, les laisses de crues, ou même les MES. Par contre elle nécessite un bassin homogène sur le plan lithologique, ce qui est le cas de la Seine, dans le cas contraire les régressions doivent être menées par province géochimique. Lorsque l'élément est très peu affecté par les impacts anthropiques, Cref est alors entaché d'une grande incertitude (figure 1, Arsenic). Exceptionnellement lorsque la contamination est nulle, la valeur de Cref peut être négative : c'est le cas de l'argent et du mercure (tableau 1.2, analyse 5), mais dans le reste des cas ces valeurs "à pollution nulle" sont très proches des autres références estimés (tableau 1.2).

3.2. Références stationnelles

Si on dispose de sédiments anciens à la station ils peuvent constituer une référence stationnelles : c'est le cas des carottes dans l'estuaire supérieur (tableau 2, analyse 1) pour Poses, ou des dépôts de Bercy (tableau 2, analyse 2), pour l'ensemble des bassins (Seine + Marne) (proche de la station actuelle d'Austerlitz). La méthode "de la double pondération" exposée précédemment peut aussi s'appliquer à chaque station. Nous en donnons un exemple pour la station de Bercy (Annexe G, Σ Bercy). Dans l'ensemble les deux références théoriques à Poses et Bercy sont très proches car leur composition lithologique n'est pas contrastée. Les plus fortes différences ne dépassent pas 20 %.

La méthode "à pollution nulle" peut également s'appliquer à des stations individuelles pour autant que : (i) les bassins correspondants soient homogènes sur le plan lithologique, (ii) les régressions métal-indicateur de pollution soient très bien définies.

3.3. Référence par échantillon

Pour une station donnée la composition chimique du matériel particulaire prélevé dépend de la granulométrie, de la composition minéralogique, de la teneur en matière organique, c'est à dire du type de matériel (sédiment déposé à MES, de son origine amont, de la section, etc...). Si la contamination ambiante est jugée sur une série d'échantillons, on est reporté au problème de la référence stationnelle. Sinon il faut estimer pour chaque échantillon analysé les teneurs qu'on aurait avec le même contexte géochimique du bassin amont mais en absence de toute contamination.

Nous nous sommes basés ici sur une approche nouvelle en 3 paliers d'abord une décomposition individuelle des échantillons en quatre parts :

- composante carbonatée essentiellement CaCO_3 , déterminée sur la base du carbone inorganique particulaire (CIP ou PIC en %) : $\% \text{CaCO}_3 = \% \text{PIC} \times 8,33$
- composante organique : déterminée sur la base du carbone organique particulaire (COP ou POC en %-) : $\% \text{MO} = \% \text{COP} \times 2,5$
- composante aluminosilicatée : elle comprend la somme des éléments majeurs exprimés en oxydes ($3\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO} + \text{TiO}_2 + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{P}_2\text{O}_5$) plus la silice liée aux aluminosilicates estimée sur la base d'un rapport (Si/Al) = 2,7 g/g dans les aluminosilicates (Si/Al = 3 pour les particules fluviale à l'échelle mondiale et Si/Al = 3 pour les argiles océaniques).
- composante quartzeuse calculée comme le complément de la somme des précédents à 100 %

En ce qui concerne les aluminosilicates ainsi déterminés on remarque que Fe, Mn, Mg, Na, K et même Ti sont très liés à Al et qu'une analyse d'Al seul pourrait suffire. Par exemple la corrélation entre Al_2O_3 et $\text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ est élevée ($R^2 = 0,711$, $n = 44$). Cette décomposition très simple a ses avantages et ses inconvénients : (i) elle est en fait basée sur 3 déterminations classiques qui devraient accompagner toute analyse de métaux : carbone inorganique et organique, aluminium, (ii) on ne détermine pas le quartz directement (ce qui serait beaucoup trop lourd par des méthodes minéralogiques directes), (iii) les aluminosilicates regroupent en fait des minéraux divers tels que argiles, feldspaths plus ou moins riches en éléments traces mais aussi les oxydes de fer et de manganèse, les minéraux lourds, par exemple sur la base du titane.

La décomposition résultante des échantillons en analyses en quatre fractions figure à l'annexe B. A chaque minéral ou cortège minéral, on a attribué une analyse chimique type, valide sur l'ensemble du bassin (tableau 3). Cette analyse est une combinaison entre l'analyse moyenne de roches sédimentaires (roches carbonatées, argiles marines, ardoises), de la valeur moyenne des végétaux terrestres d'après Bowen, et de quelques échantillons particuliers pris sur le bassin comme DM2, très riche en argiles CSD36B très riche en quartz (87 %) et CSD44 très riche en carbonates (74 %). C'est donc une valeur d'expert qui tient compte aussi de la réalité du bassin.

Tableau 3. *Teneurs en métaux particuliers théoriques de quatre assemblages minéraux.*

Niveaux naturels	Quartz ($\mu\text{g.g}^{-1}$)	Calcite ($\mu\text{g.g}^{-1}$)	Mat. Org. ($\mu\text{g.g}^{-1}$)	Alumino-silicate ($\mu\text{g.g}^{-1}$)
As	3	5	5	6
Cd	0,08	0,2	0,4	0,2
Cr	30	25	1	70
Cu	6	8	25	20
Hg	0,01	0,010	0,15	0,05
Ni	6	25	3	30
Sb	0,3	0,3	0,1	0,8
Se	0,01	0,8	1,1	0,4
Pb	10	15	5	20
Zn	20	60	150	50
P	100	200	1800	550
Co	4	5	0,5	8

Le dernier pas de notre approche combine les proportions théoriques des assemblages minéraux (annexe B) et les analyses chimiques types (tableau 4) pour reconstituer à chaque échantillon la composition chimique naturelle (annexe C).

Les valeurs extrêmes et médianes des proportions théoriques des 4 types de minéraux ainsi calculées sont présentées au tableau 4. On note la grande variabilité possible sur le bassin. Cependant notre échantillonnage est biaisé par nos choix et non représentatif de l'ensemble du bassin

Tableau 4. *Assemblages minéraux théoriques. Echantillons de laisses de crues de dépôts fins (1994 – 1998) (n = 70)*

	Minimum	Médiane	Maximum
Calcite	0,0 %	33 %	73 %
Matière Organique	0,75 %	8 %	26,3 %
Alumino silicates	5 %	26 %	53 %
Quartz résiduel	0,4 %	30 %	87 %

Une façon de valider ce modèle est de considérer les analyses des 6 échantillons composites (C1 à C6) des principaux types de roches du bassin. Ce test est présentée en annexe D. La décomposition en types de minéraux fait apparaître pour les "calcaires" (C1) et la "craie" (C5) une proportion non négligeable de "quartz", de matière organique (MO) et d'aluminosilicates (clays) résultant de la décarbonatation des roches carbonatées qui contiennent toujours des minéraux non carbonatés qui vont s'accumuler dans les couvertures pédologiques. Le "quartz" de ces échantillons peut être en fait de la silice amorphe, ou du quartz éolien. Le composite C3 est bien à dominante de quartz (79 %) et le composite C6 est bien essentiellement cristallin (seulement 2,5 % de calcite). Si on considère les concentrations théoriques et mesurées des 6 composites pour les 12 éléments considérés il y a en général une bonne correspondance sauf pour les valeurs mesurées d'As, Cd et Pb dans C6 qui sont très fortes. As est ici douteux et est en cours de vérification. Pour la moitié des couples de valeurs (n = 74) l'erreur relative entre les valeurs théoriques et mesurées est inférieure à 30 % pour les 2/3 elle est inférieure à 50 %. Cette différence est liée aux problèmes que nous avons déjà soulevés et, peut être, à une légère contamination ambiante des sols forestiers via l'atmosphère. Pour certains éléments comme pour le phosphore les valeurs théoriques choisies au tableau 3 sont sans doute sous-estimées. Pour Cd, Hg, Sb les différences peuvent aussi s'expliquer par les incertitudes analytiques élevées à ces très bas niveaux ; de 20 ou 30 %.

3.4. Variabilité théorique du bruit de fond géochimique dans le bassin de la Seine

D'après les valeurs théoriques établies pour les assemblages minéraux (tableau 3) on peut observer que les carbonates et le quartz sont des diluants de la plupart des métaux en traces alors que la matière organique et surtout, les aluminosilicates en sont enrichis. Suivant la proportion relative de ces minéraux dans un échantillon, qui peut varier à une station donnée suivant le type de particule, leur transport, leurs origines, etc..., on peut donc s'attendre à des variations naturelles non négligeables (cf . annexe C). Le tableau 2 (analyses 9 et 10) résume les niveaux théoriques minimum et maximum relevés dans 70 échantillons : la variabilité naturelle théorique va d'un facteur 2 à 6 suivant les éléments. Vu la contamination générale du bassin il sera malheureusement impossible de vérifier cette gamme, qui n'est cependant pas une surprise pour les géochimistes.

Cette variabilité justifie de considérer des références modulables suivant la nature des échantillons. Jusqu'ici elle a été prise en compte soit en normalisant à Al, soit en faisant des corrections de quartz, ou de carbonates, soit, quelquefois, en faisant une double normalisation à Al puis au COP. L'approche que nous avons utilisée ici combine en fait ces quatre types de corrections.

4. Indicateurs de contamination métallique

Les indicateurs sont généralement basés sur des valeurs de référence, dans la plupart des cas des "références de bassin". Nous avons testé ici des nouveaux types d'indicateurs de contamination valables pour chaque échantillon, sur la base des valeurs de référence théoriques de ceux-ci (§ 3.3).

4.1. Rapport de Contamination Métallique : CR

C'est un nombre adimensionnel calculé pour chaque échantillon (j) et sur chaque élément (i) :
$$Crij = (Mmes)ij / (Mref)ij$$

Avec Mmes et Mref, les teneurs mesurées et de référence. Lorsque la contamination est nulle CR est théoriquement égal à l'unité. L'annexe E présente ces résultats. En fait nous avons vu qu'un écart de 30 % à 50 % entre les valeurs théoriques et mesurées sur des échantillons réputés non contaminés est possible. CR varie donc largement autour de 1 pour les 6 composites C1 à C6.

CR permet de mettre en évidence la grande variabilité de la contamination suivant les stations et les éléments. Certains éléments apparaissent comme non-sensibles aux activités humaines ($0,5 < Crij < 2$), comme Co et As, d'autres sont très sensibles comme Cu, Cd, Hg, Pb et Zn.

4.2. Indice de pollution : PI

Comme CR est adimensionnel et calculé pour chaque échantillon et chaque élément (annexe F) :

$$PIij = [(Mmes)ij - (Mref)ij] / (Mref)ij$$

PIij est donc égal à zéro en l'absence de contamination. Si le niveau théorique de référence est plus faible que le niveau mesuré PI peut être négatif, c'est un des biais de cet indice. En soit PI n'apporte pas d'information supplémentaire par rapport à CR mais permet de calculer l'indicateur MPI qui suit. L'échelle des Pii n'est pas linéaire avec le rapport de contamination (Cri) :

PI	0	0,5	1	2	3	4	9	19
CR	1	1,5	2	3	4	5	10	20

Il faut noter que MPI et OPI étant tous deux adimensionnels ils permettent des combinaisons entre plusieurs éléments de niveaux de teneurs très différents, par exemple le mercure et le zinc.

4.3. Indicateur de Pollution Métallique : MPI

Cet indicateur est basé sur les cinq éléments les plus sensibles aux activités humaines dans le bassin : $MPI_j = \sum P_{ij}$

Avec P_{ij} indices de pollution de l'échantillon (j) pour **Cd, Cu, Hg, Pb, Zn**

Les rapports de contamination pouvant aller jusqu'à 20, et parfois plus, dans les échantillons du bassin, MPI s'étale entre 0 et 100, ce qui correspond à une échelle très facilement utilisable. Un MPI de 95 signifie un rapport de contamination (CRi) moyen de l'ordre de 20 pour l'ensemble des cinq métaux pris en compte, ce qui est considérable :

MPI	0	2,5	5	10	15	20	45	95
Cr moyen par métal	1	1,5	2	3	4	5	10	20

Sur 70 échantillons traités MPI n'a dépassé 100 que pour trois d'entre eux, LCM36 (MPI = 128) et CSD54 (MPI = 140), tous deux sur l'Eure à Léry et pour DM12 (MPI = 100) sur l'Orge à Savigny. L'ensemble des valeurs calculées du MPI est présenté au tableau 1. Trois échantillons réputés non contaminés ont des MPI négatifs (C5, EB8, C1), sept échantillons sont compris entre 0 et 1,8.

4.4. Utilisation du MPI

Au vu des valeurs de MPI déterminées sur nos premières séries d'échantillons (n = 70, tous analysés par le même laboratoire avec les mêmes protocoles analytiques) on peut proposer l'interprétation suivante :

	MPI
Absence d'impact significatif	< 3
Impact essentiellement rural	3 – 10
Impact urbain faible	5 – 10
Impact urbain fort	15 – 30
Impact urbain sévère	30 – 50
Impact industriel marqué	40 – 60
	50 – 150

On notera le recouvrement des limites dans certains cas. Comme on le verra l'impact urbain, lié à une association caractéristique des métaux, peut brouiller l'impact rural. Il peut aussi masquer des contaminations industrielles si celles ci sont caractérisées par des associations proches de celles rencontrées dans les milieux très urbains : les différentes sources de contamination urbaine, rejets domestiques, lessivage des toits et des chaussées par ruissellement, petites activités industrielles et artisanales, activités diverses (hopitaux, laboratoire, etc...) sont alors confondues.

• Robustesse du MPI

Pour pouvoir être utilisé d'une façon pratique le MPI doit être relativement peu variable à la fois dans l'espace et le temps, particulièrement pour les cours d'eau les plus grands (ordre hydrologiques 6, 7 et 8). On note que le MPI peut être défini sur n'importe quel type d'échantillon (sédiment de fond, matière en suspension) même de granulométrie plus grossière que celle des MES.

Ici notre échantillonnage sur les ordres 6 à 8 a porté surtout sur les laisses de crues (typiquement $Q > 1\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ à Poses) : on pouvait donc craindre une certaine homogénéité entre l'amont et l'aval des sources de pollution, c'est à dire l'agglomération parisienne, du fait de la grande dilution par des particules amont détritiques et peu contaminées. En fait l'analyse fine des MES lors des crues (Idlafkih, 1998) en amont et en aval de Paris révèle un impact marqué même lorsque les MES excèdent 100 mg/L. Cet impact reste également bien net sur les laisses de crues (Horowitz et al

1999, sous presse). Il en est de même ici pour le MPI : le tableau 5 présente l'évolution spatio-temporelle du MPI sur 35 échantillons pris entre Montereau et Poses et sur l'Eure à Léry.

Entre la Marne à Annet – ou à Esbly (MPI = 6,6) – et la Seine à Poses le MPI varie d'un facteur cinq. Par contre d'une année sur l'autre à la même station (Marne à Maison Alfort, Seine à Ivry, Eure à Léry) la variabilité relative du MPI est de l'ordre de 10 à 30 % seulement. L'échantillon CSD43 pris sur l'Ile de la Jatte en 1994 constitue une exception (il est aussi caractérisé par des associations métalliques particulières).

Cette relative stabilité sur cinq années observée au cœur du bassin (elle doit être confirmée par des valeurs sur l'Oise aval mais les sites appropriés n'ont pas encore été trouvés) montre qu'en fait, sur les ordres 6 à 8, le stock de matériaux contaminés est très important et que même une grosse crue, c'est à dire un flux de sédiment de l'ordre de 100 000 tonnes, conserve en grande partie la mémoire de la contamination acquise. L'analyse ultérieure complète des échantillons de 3 crues de 1998 (janvier, mai et novembre) devrait permettre d'affiner ce point important.

Tableau 5. Valeurs de l'indicateur de pollution métallique (MPI) sur les laisses de crues

	Code	1994	1995	1996	1997	1998j	Moyenne MPI	Densité Population
Yonne Montereau	YM	19,2	9.4				14	27
Marne Annet	MA		10.8				11	75
Marne Maison Alfort	MM	20.5	20.2	17.0	13.4	14.2	17	200
Seine Ivry	SI	23.8	22.8	24.0	25.7	26.6	24.5	105
Seine Alma	SA	25.7	32.5	-	-	-	29	160
Seine Jatte Puteaux	SJ	76.0	27.0	29.6	23.1	32.6	37	180
Seine Croissy	SCR			53.5	58.2		56	180
Seine Mantes	SM	55.0	-	60.4	38.1		51	240
Seine Poses	SP	61.4	46.0	46.1	-	37.4	48	240
Orge Savigny	OR			78.7	100.7		110	[800]
Eure Léry	EL	139	92.9	81.5	-	128.2	90	83

1998j = Janvier 98

• Reproductibilité du MPI

Quatre premiers tests de reproductibilité du MPI a un site donné ont été réalisés à Esbly sur Marne, à Puteaux (bras droit de la Seine à Poses) et sur l'Aisne à la confluence Oise-Aisne en prélevant chaque fois 2 échantillons à la même station :

Lorsque les échantillons sont très grossiers, sable moyen et grossier sur l'Aisne, silt grossier sur la Marne, les MPI correspondants sont nettement plus faibles que ceux mesurés sur les échantillons fins (sablons fins et argiles) malgré les corrections de matrice quartzeuse et carbonatées qui sont effectués dans la détermination des valeurs théoriques : **les sédiments sableux, même corrigés ne gardent donc pas la mémoire de la contamination et les sédiments sablonneux ne la gardent pas complètement.** Par contre deux échantillons fins pris et analysés séparément, donnent des valeurs de MPI quasi identiques. Pour autant qu'on dispose d'un matériel fin typiquement du sablon fin et en dessous – le MPI est donc reproductible. L'analyse de sédiments grossier (> 200 µm) est à proscrire dans les suivis réguliers de contamination.

Station	Numéro	MPI sédiment fin	MPI sédiment grossier
Aisne	CSD 36	10,5 [f]	1,7 [c]
Marne	CSD 45	10,4 [f]	6,6 [g]
Seine Puteaux	LCM 26A	23,2	
	LCM 26B	23,0	
Seine Poses	CSD 53	69,6	
	CSD 53b	61,4	

5. Indicateur de Pollution Organique : OPI

Cet indicateur encore largement expérimental est développé parallèlement au précédent ; il concerne les matières oxydables décrites par le carbone organique particulaire (COP ou POC) le phosphore particulaire total (PP), le soufre particulaire total (SP). Dans sa version finale développée en 1999 il devrait comporter également l'azote particulaire total (NP). Il ne concerne pas la contamination par les produits organiques persistants tels que HAP, PCB, etc... pour lesquels un autre indicateur indépendant sera développé. OPI est la somme pondérée d'indices de contamination élémentaires par rapport à une référence théorique liée à la présence de matière humique d'origine pédologique ou "détritique" dans les échantillons :

$$OPI = 6(COP_{mes} - COP_{det})/POC_{det} + 3(PP_{mes} - PP_{det})/PP_{det} + 1(SP_{mes} - SP_{det})/SP_{det}$$

Avec POC mes et POC det, valeurs mesurées et d'origine pédologique, respectivement.

Les coefficients de pondération choisis ici sont une tentative pour exprimer l'importance relative des problèmes et sont calés pour aboutir à un indice proche de 100 pour une contamination maximale.

Les valeurs d'origine pédologique sont ici largement estimées. On s'est aperçu que, dans les échantillons de matière particulaire fluviale récentes et non contaminées (bassin forestiers notamment), le POC était lié à Al selon la relation suivante :

$$COP_{det} (\%) = 1.0 Al(\%) - 0,4$$

La variation de COP et de PP dans les mêmes échantillons est la suivante :

$$PP_{det} (ppm) = 200 COP (\%) + 300$$

Enfin le soufre particulaire détritique est estimé ainsi :

$$SP_{det} (\%) = 0,025 Cop (\%)$$

Lorsque la valeur théorique du COP det, PP det ou du SP det est inférieure à la valeur mesurée la différence (Cmes – Cdet) est comptée comme nulle. En l'absence d'une des analyses de COP ou PP, OPI n'est pas calculé, en l'absence de SP, OPI est approché. On remarquera que l'OPI dépend de la mesure de l'aluminium qui "marque" ici la matière organique d'origine humique. La relation Al - COP det s'explique par le fait que dans un bassin très largement carbonaté, ces éléments proviennent tous deux des sols. Comme on le verra Al n'est pas sensible aux impacts anthropiques sur les laisses de crues, pas plus que sur les MES (Idlafkih, 1998).

• Variabilité de l'OPI

Malgré son caractère provisoire, puisqu'il ne prend pas encore en compte l'azote particulaire, l'OPI varie de moins de 2 à près de 100 (97 pour DM5 sur la Vesle à l'aval de Reims) (tableau 6). Il semble donc bien adapté à décrire ce type de pollution et varie sur une gamme analogue à celle de MPI.

Si on reconsidère les stations majeures échantillonnées plusieurs fois sur la Seine, la Marne et l'Eure, comme nous l'avons fait pour l'Indicateur de Pollution Métallique (MPI voir tableau 5), on remarque une dispersion des valeurs d'une année à l'autre nettement plus forte. Par contre le gradient longitudinal amont-aval est en général bien rendu. Il faut noter ici l'extrême pollution organique des échantillons pris sur l'Orge à Savigny. Exceptionnellement il ne s'agit pas de laisse de crues mais de dépôts très fins prélevés sur une banquette du lit mineur. L'Orge y est sans doute plus proches d'un effluent urbain que d'un cours d'eau naturel.

Tableau 6. Valeurs de l'indicateur de pollution organique (OPI) sur les laisses de crues.

	Code	1994	1995	1996	1997	1998j	Moyenne OPI	Densité Population
Marne Annet/Esbly	MA	14,5	0,6				7,55	75
Marne Maison Alfort	MM	10,5	6,8	14,8	10,7	13,8	11,3	200
Seine Ivry	SI	8,3	5,3	13,0	8,5	9,8	9,0	105
Seine Alma	SA	8,6	7,7				8,2	160
Seine Jatte Puteaux	SJ	25,2	8,4	18,7	4,0	10,4	13,4	180
Seine Croissy	SC			9,2	34,7		22,0	180
Seine Mantes	SM	31,3		38,0	20,3		29,2	240
Seine Poses	SP	40,3	31,3	38,6		20,7	32,7	240
Orge Savigny	OR			81,7	88,6		85,0	[800]
Eure Léry	EL	16,9	21,1	29,9	19,0		21,7	83

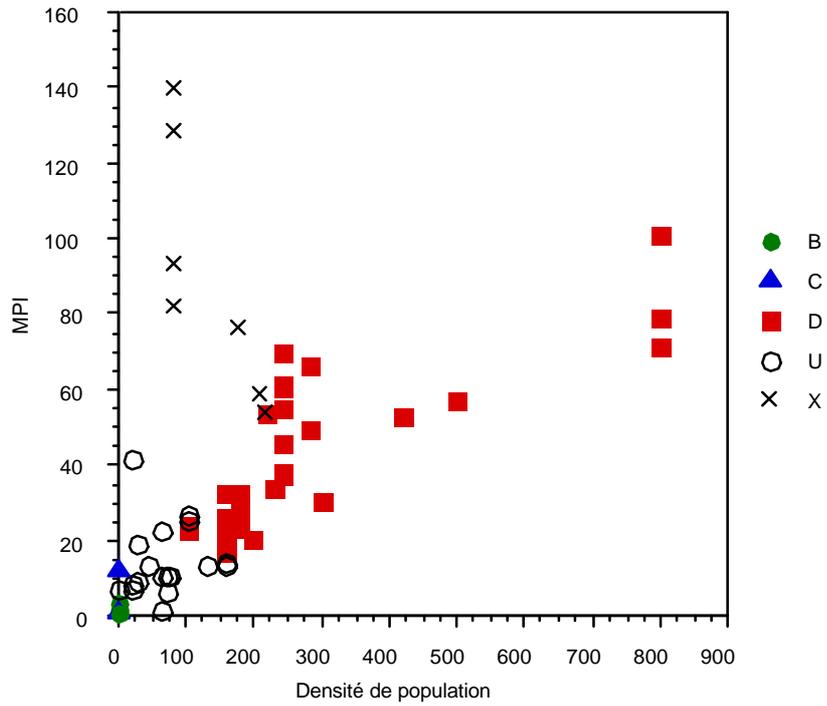
6. Relations MPI – OPI – densité de population

La densité de population sur les bassins situés à l'amont des stations de prélèvement ; celle du Ru de Gally pose un problème en raison de la connexion des effluents traités de la stations d'épuration de Versailles Ouest, elle a été finalement estimée à 500 hab/km².

Les deux indicateurs MPI et OPI sont directement liés aux densités (figure 2A et 2B) à l'exception pour le MPI de 6 ou 7 échantillons qui présentent une contamination générale très excessive par rapport à leur population et, nous le verrons, des associations métalliques particulières. Comme nous l'avons déjà signalé l'OPI est plus variable, mais la relation avec la densité est nette hormis les 8 échantillons caractérisés par des associations de métaux particulières (échantillons X).

Lorsque le MPI est porté en fonction de l'OPI (figure 3), on observe une bonne corrélation même si les valeurs de MPI observées sur l'Orge paraissent un peu faibles : il y a donc un fond de contamination proportionnel à la densité de population attribuable à un ensemble de pollutions urbaines déjà évoqué et les premières mesures effectuées sur des bassins péri-urbains (Orge, Meauldre, ru de Gally, Yerres) ou à l'aval de grosses agglomérations (Vesle) s'inscrivent bien dans cette relations. **Il en résulte que les échantillons les plus contaminés ne sont pas ceux pris à l'aval de l'agglomération parisienne (Croissy, Mantes, Poses voir tableaux 5 et 6) mais sur des cours d'eau péri-urbains et/ou à très forte indice de pression humaine** (rapport de la population au débit spécifique, Meybeck 1998, Mouchel et al 1998).

Ce point devra être précisé et confirmé en 1999. Il faut noter ici que le bassin de la Seine présente une homogénéité remarquable des exportations de MES pour les ordres hydrologiques supérieurs (Meybeck et al, 1998), la dilution des matériaux particuliers contaminés par l'érosion des sols et des lits fluviaux s'effectue donc de la même façon partout. Dans des bassins très hétérogènes, avec des variations des transports solides moyens sur un ordre de grandeur ou plus, l'influence de la densité de population peut être brouillée par l'abondance des particules détritiques comme c'est le cas en Chine sur le Huang He et le Chianj Jiang.



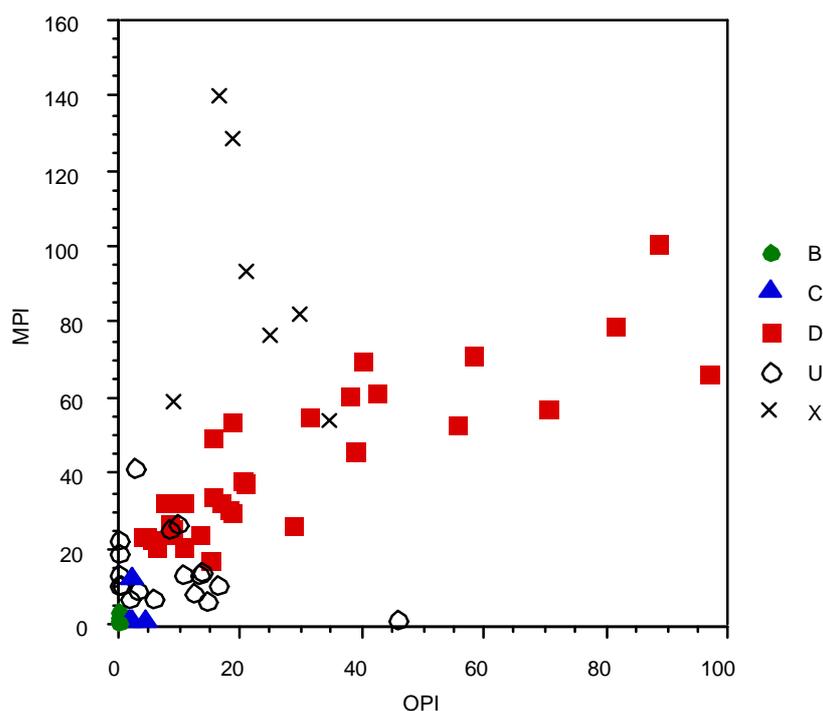


Figure 3. Relation MPI – OPI.

7. Sensibilité des éléments métalliques aux activités humaines

Le bassin de la Seine combine quatre grandes sources directes de contaminants métalliques : rejets domestiques, ruissellement urbain, rejets industriels, érosion des terres cultivées. Par contre l'activité minière y est quasiment absente. Nous avons testé ici la sensibilité anthropique d'une trentaine d'éléments analysés en se basant sur le MPI : les régressions élément – MPI ont été systématiquement calculées et, malgré une contamination métallique moyenne d'un facteur 5, 10 (ou même 20 pour l'Eure), certains éléments ne présentent aucune corrélation avec MPI et/ou OPI et ne sont donc pas actuellement sensibles dans le bassin à des pollutions domestiques, urbaines et/ou industrielles. Le coefficient de corrélation des éléments (r^2) avec le MPI permet d'établir une échelle de sensibilité à la pression humaine (figure 4) depuis les éléments "non affectés" ($r^2 < 0,1$) jusqu'aux éléments "très affectés" ($r > 0,7$) dans lesquels on trouve Zn, Cd, Hg, Pb mais aussi le phosphore. On doit remarquer que Cd, Cu, Hg, Pb et Zn n'ont chacun qu'un poids relatif de 20 % dans le MPI et donc que leur auto-corrélation avec celui-ci reste limitée. Par contre ils sont bien corrélés entre eux.

On note plus particulièrement que l'ensemble des éléments majeurs – Al, Fe, Mn, Ti, Mg, Ca, Na, K et PIC – n'est pas, dans le bassin, sensible aux activités humaines, de même que V, Li, La, Co, As, Be, Ba et Sr. Le cas de l'arsenic est une heureuse surprise car il a été en excès marqué sur d'autres bassins européens comme le Rhin. On remarque aussi que le nickel et le chrome sont très peu influencés. Par contre l'antimoine et surtout l'argent le sont plus nettement.

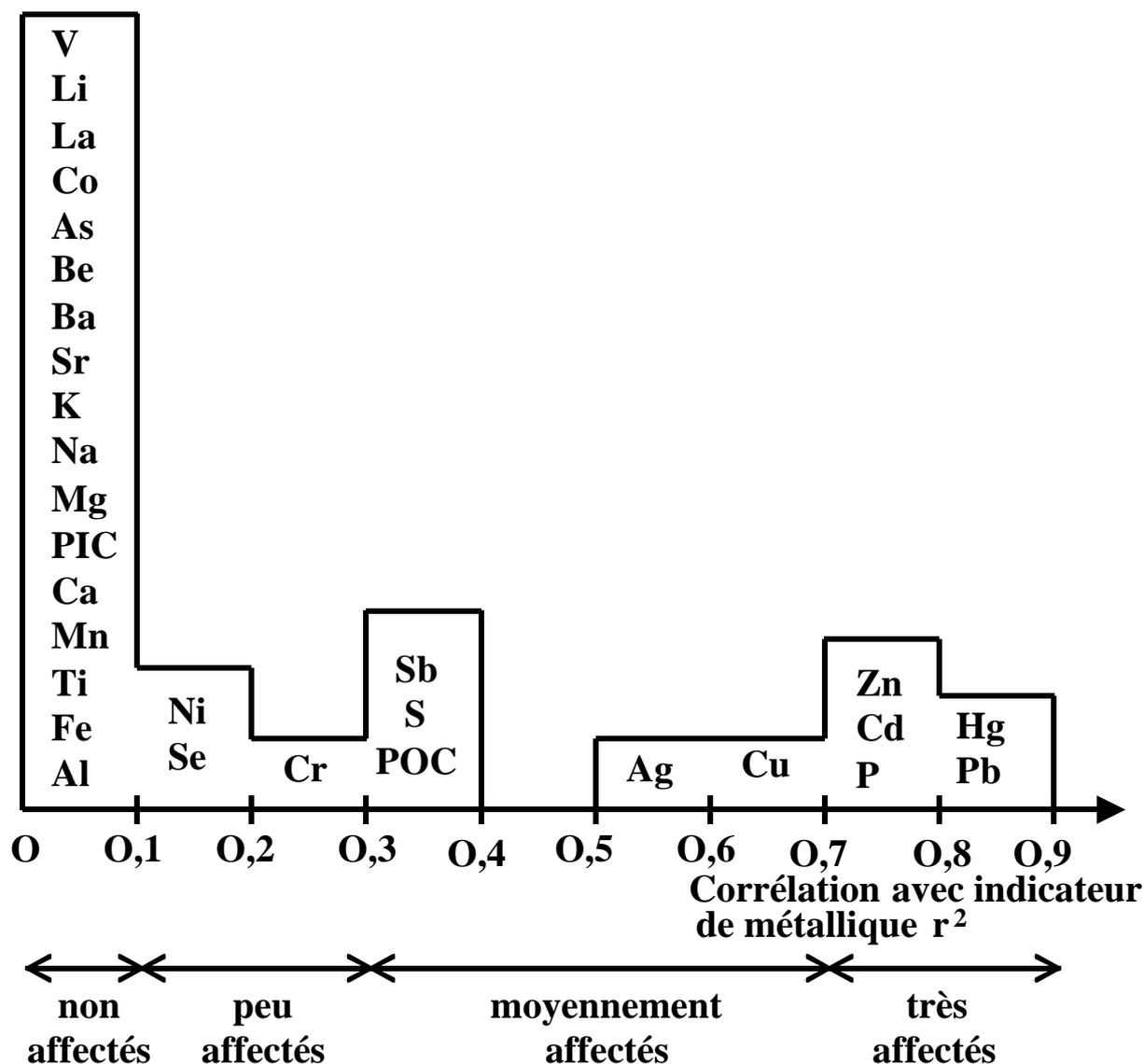


Figure 4. Sensibilité des éléments à l'indicateur de contamination métallique

Conclusions

Plusieurs approches novatrices ont été tentées, elles visent toutes à permettre une meilleure interprétation des données recueillies. La question des "références naturelles" est centrale dans ce travail. En fait on s'aperçoit de la variété des approches possibles pour les définir à des échelles variées : ensemble d'un bassin, station et même échantillon. Un modèle théorique met en évidence une variabilité possible des teneurs naturelles d'un facteur 2 à 6 suivant les échantillons. Ce modèle est encore imparfait puisque, comparé à 6 échantillons composites réputés non pollués les valeurs naturelles théoriques s'éloignent de plus de 30 % par rapport aux valeurs mesurées pour la moitié des analyses et de plus de 50 % pour un tiers d'entre elles. La question de la référence est donc bien posée au niveau de l'échantillonnage lui-même.

Notre démarche nouvelle reconstitue les valeurs naturelles théoriques des éléments traces sur la base de quatre associations minérales – elles-mêmes déterminées sur l'analyse des éléments particuliers majeurs – pour chaque échantillon. Les écarts relatifs des concentrations mesurées et théoriques pour cinq métaux critiques Cd, Cu, Hg, Pb et Zn sont combinés pour former un indicateur

de pollution métallique, le MPI. Comme cet écart est relatif il est moins sensible aux incertitudes apportées aux références naturelles.

Le MPI, qui varie dans le bassin de moins de 3 à 100 et plus, s'avère un bon descripteur des gradients spatiaux de contamination sur les ordres moyens (3, 4 ou 5) comme sur les ordres supérieurs (6, 7 et 8). Sa variabilité interannuelle, ici décrite sur des laisses de crue, est de l'ordre de 10 à 30 % à une station donnée sur 4 ou 5 ans pour autant qu'il soit déterminé sur des échantillons fins (argiles à sablon fin) car les sables grossiers ne conservent pas la mémoire de la contamination.

Un indicateur analogue a été développé pour la pollution organique (OPI). Il est basé sur le carbone organique, le phosphore et le soufre particulaire avec des poids variables, en attendant l'incorporation de l'azote particulaire. Il varie également entre 1 et 100.

Les deux indicateurs sont bien liés ensemble à l'exception des échantillons de l'Eure à Léry et de quelques échantillons à l'aval de Paris, tous caractérisés par une contamination métallique plus forte et surtout des associations de métaux particulières attribuées à des sources spécifiques, sans doute industrielles : mercure à l'aval de Paris, Cd, Pb et Sb sur l'Eure. Ces huit échantillons doivent être considérés à part. Les 62 autres présentent un continuum de contamination suivant un gradient de densité de population croissant de moins de 1 hab/km², échantillons pris dans les petits bassins forestiers monolithologiques, jusqu'à plus de 500 hab/km² sur les cours d'eau péri-urbains. **Cette "contamination urbaine" est caractérisée par une association typique de métaux Hg, Pb, Zn, Ag et en second lieu Cu, Cd, Zn – avec le carbone organique et le phosphore particulaire.**

Les travaux prévus en 1999 permettront : (i) d'affiner ces relations sur de nouveaux échantillons de cours d'eau péri urbains, (ii) de tester le MPI sur 3 crues successives observées en 1998, (iii) d'intégrer l'azote particulaire dans le calcul de l'OPI, (iv) de préciser les assemblages naturels et anthropiques d'éléments pour les matrices organique, carbonatée, quartzreuse, aluminosilicatée et, éventuellement de minéraux lourd et pour diverses sources industrielles.

Références

Avoine, J., Boust, D., et Guillaud, J.F. (1986). Flux et comportement des contaminants dissous et particulaires dans l'estuaire de la Seine, Rapp. P ; - *V Réun. Cons. Int. Explor. Mer.* **186**, 392-411.

Horowitz A.J., Meybeck M., Idlafkih Z., Biger E. (1999). Variations in trace elements geochemistry in the Seine river basin based on floodplain deposits and bed sediments. *Hydrol. Processes* (sous presse)

Idlafkih, Z. (1998). Transport des ions majeurs, nutriments carbone organique et métaux particulaires dans un fleuve anthropisé : la Seine. *Thèse de l'Université Paris VI*, 204 p. + annexes.

Idlafkih Z., Meybeck M., Bourguignon O. (1997). Comparaison de cinq stations amont-aval de Paris en 1994-95 : nutriments, carbone organique et métaux particulaires. In : *Rapport Piren-Seine 1996, IV, Lab. Géol. Appliquée, Univ. Paris VI*, 57 p.

Meybeck, M. (1998). Man and river interface : multiple impacts on water quality illustrated by the river Seine. *Hydrobiologia* **373-374**, 1-20.

Meybeck M., Mouchel J.M., Idlafkih Z., Andreassian V., Thibert S. (1998). Transferts d'eau, de matière dissoute et particulaire dans le réseau fluvial. In : Meybeck M., De Marsily G., Fustec E. (eds), *La Seine en son bassin*, 345-389.

Mouchel J.M., Boët P., Hubert G., Guerrini M.C. (1998). Un bassin et des hommes : une histoire tourmenté, p.77-125. In : Meybeck M., De Marsily G., Fustec E. (eds), *La Seine en son bassin*, 345-389.

Thévenot D., Meybeck M., Chestérikoff A., Chevreuil M. (1998). Métaux : sources multiples et accumulation. In : Meybeck M., De Marsily G., Fustec E. (eds), *La Seine en son bassin*, 391-437.

Thibert S. (1994). Exportations naturelles et anthropiques des ions majeurs et des éléments nutritifs dans le bassin de la Seine. *Thèse de l'Université Paris VI*, 202 p + annexes

Annexes

Annexes 0 : Résultats analytiques obtenus sur les dépôts de crue et les sédiments dans le bassin de la Seine : « actual analyses of elements in flood deposits ».

Annexe A : Coefficients de pondération α , β et γ à Poses et Bercy.

Annexe B : Composition minéralogique théorique des échantillons : « theoretical mineral assemblage »

Annexe C : Composition chimique naturelle théorique des échantillons : « theoretical levels based on the mineral assemblage ».

Annexe D : Comparaison des analyses effectuées sur les composites C1 à C6.

Annexe E : Rapport de contamination ($C_{rij} = M_{eij} / M_{refij}$) pour chaque élément.

Annexe F : Indice de pollution PI_j et indicateur de pollution métallique (MPI).

Annexe G : Composition théorique des sédiments fluviaux moyens à Poses et à Bercy.

Annexe H : Protocoles d'analyses.

**Annexe 0. Résultats analytiques obtenus sur les dépôts de crue et les sédiments
dans le bassin de la Seine**

Sample Name	River Station	Type	As ppm	Cd ppm	Cu ppm	Hg ppm	Pb ppm	Zn ppm	P ppm	Al %	POC %	PIC %	PS %
BER12	Seine paleo Berçy	B	16,90	0,30	14,00	0,02	24	100	650	4,6	1,00	6,80	
BER51	Seine paleo Berçy	B	7,70	0,40	10,00	0,02	24	100	220	4,5	0,30	6,70	
C1	Comp. Limestone	C	6,60	0,20	7,00	0,02	16	72	650	2,1	3,70	5,50	0,10
C2	Comp. Sand/clay	C	5,00	0,20	7,00	0,01	19	48	470	2,7	1,20	0,70	
C3	Comp. Qz sand	C	2,20	0,10	6,00	0,05	14	28	260	2	1,50	0,00	
C4	Comp. Marl	C	6,60	0,20	15,00	0,02	20	56	650	2,9	2,10	2,90	0,10
C5	Comp. Chalk	C	1,90	0,10	9,00	0,01	13	51	940	1,6	3,80	7,60	0,10
C6	Comp. Cristall.	C	140,00	1,50	12,00	0,06	88	100	930	6	6,30	0,30	0,10
CSD27	Seine Ivry	D	11,00	0,70	72,00	0,32	100	265	1400	3,7	4,20	4,20	0,09
CSD28	Marne Alfort	D	5,30	0,60	41,00	0,29	56	190	1300	2,5	2,10	5,20	0,11
CSD29	Yonne Montereau	U	10,40	0,50	21,00	0,18	105	165	810	2,4	1,40	3,60	0,05
CSD32	Oise upst. Compiègne	U	8,40	1,10	26,00	0,27	39	185	1200	2,9	1,80	1,70	0,01
CSD35	Seine Alma	D	9,00	0,90	64,00	0,28	115	280	1400	3,4	3,60	4,40	0,09
CSD36	Aisne upst. Comp.	U	4,50	0,10	21,00	0,20	34	110	1200	2,3	2,20	2,30	0,16
CSD36b	Aisne upst. Comp.	U	1,30	0,10	5,00	0,04	10	25	350	0,5	0,30	0,90	0,03
CSD37	Seine Mantes	D	6,30	1,80	80,00	0,66	160	355	2200	2,3	2,70	4,40	0,14
CSD39	Oise Cergy	D	4,10	0,30	24,00	0,34	63	120	880	1,2	1,30	2,70	0,11
CSD40	Seine Conflans	D	8,90	1,50	96,00	0,75	150	380	2000	3,4	3,40	4,40	0,13
CSD42	Seine Mon Lafitte	D	4,90	1,00	81,00	0,54	180	290	1600	2	1,20	4,60	0,10
CSD43	Seine Jatte	X	6,10	0,90	77,00	1,30	160	300	1800	2,1	2,20	4,70	0,11
CSD44	Seine Bray	U	3,00	0,10	46,00	0,10	27	76	660	1,2	1,30	8,80	0,03
CSD45f	Marne Esbly	U	6,30	0,20	31,00	0,17	44	125	990	3	2,00	4,40	0,04
CSD45g	Marne Esbly	U	3,30	0,10	23,00	0,07	35	71	680	1,1	0,90	5,20	0,05
CSD46	Grand Morin	U	5,50	0,10	57,00	0,25	48	110	730	3,2	3,00	1,30	0,07
CSD53	Seine Poses	D	9,00	3,20	161,00	1,20	155	600	4200	3,8	5,60	4,00	0,19
CSD53b	Seine Poses	D	6,00	2,10	86,00	0,92	105	365	3000	2,2	3,00	4,50	0,09
CSD54	Eure Lery	X	6,90	5,60	154,00	0,60	1200	440	2000	4,4	6,80	1,70	0,17
CSD67	Seine Romilly	U	5,80	0,10	20,00	0,14	55	82	860	2,6	2,90	7,00	0,05
DM11	Yvette aval	D	4,80	0,60	49,00	0,36	68	170	1400	2,1	2,10	0,30	0,10
DM12	Orge Sav	D	5,30	1,40	140,00	1,61	230	410	5800	2,2	3,30	1,30	0,20
DM2	Artoise	B	4,10	0,10	6,00	0,06	16	35	260	4,6	0,60	0,00	0,10
DM5	Vesle	D	4,90	2,50	180,00	0,82	160	950	4700	1,7	7,60	5,30	0,20
DME	Ecaillon	U	4,50	0,40	15,00	0,08	34	93	910	3,2	2,30	0,30	0,10
EB5	Ref. Stream	B	4,20	0,20	44,00	0,02	21	79	370	2,4	1,80	6,80	
EB8	Ref. Stream	B	7,30	0,10	5,00	0,02	14	34	200	2,1	0,50	0,30	
LCM 46	Irawady	0	1,70	0,10	5,00	0,03	22	32	250	5,6	0,10		
LCM1	Orge Savigny	D	9,70	3,00	210,00	1,10	310	750	5400	2,9	10,50	1,60	0,40
LCM10	Seine Mantes	D	10,50	2,50	140,00	1,30	140	540	4100	4,3	6,50	3,70	0,28
LCM11	Seine Corbeil	U	6,50	0,40	23,00	0,17	60	140	1000	2	2,60	4,10	0,05
LCM12	Seine Ivry	D	11,20	0,80	89,00	0,35	94	320	1900	4,4	5,50	4,10	0,15
LCM2	Seine Croissy	X	9,00	1,90	120,00	0,91	160	460	3000	3,5	5,60	3,90	0,24
LCM23	Seine Croissy	X	10,80	1,50	100,00	1,48	110	330	2300	4,6	4,20	3,40	0,10
LCM24	Marne Maison Alfort	U	5,30	0,40	37,00	0,15	48	120	1300	2,4	1,40	4,30	0,10
LCM25	Seine Mantes	D	8,30	1,90	80,00	0,53	99	300	3000	3,7	3,40	4,20	0,10
LCM26A	Seine (Puteaux)	D	10,60	0,90	69,00	0,39	75	220	1800	5	3,30	3,00	0,10
LCM26B	Seine (Puteaux)	D	10,10	1,10	66,00	0,35	73	210	1700	4,8	3,30	3,20	0,10
LCM27	Seine Pont Neuf	D	5,70	1,00	57,00	0,38	110	210	1700	2,4	2,10	4,70	0,10
LCM28	Seine Ivry	U	13,00	1,00	96,00	0,32	110	320	2100	4,8	4,80	4,00	0,10
LCM29	Seine (Puteaux)	D	8,20	1,20	96,00	0,46	110	300	2000	4	3,90	4,30	0,10
LCM3	Yerres	D	8,50	1,60	87,00	0,38	110	390	2300	4,4	4,70	1,60	0,20
LCM30	Orge Sav	D	11,70	2,40	250,00	0,94	300	770	4800	3,8	9,80	2,00	0,40
LCM32	Marne Maison Alfort	U	4,20	0,60	35,00	0,14	52	110	1400	2,2	1,40	4,80	0,10
LCM33	Seine Ivry	U	7,40	0,80	57,00	0,31	85	200	1400	2,7	2,10	4,00	0,10
LCM34	Yerres	D	10,80	1,70	100,00	0,38	100	490	2700	5,8	6,40	0,80	0,20
LCM36	Eure Lery	X	4,90	4,20	110,00	0,40	1200	290	1800	3,4	6,00	2,70	0,10
LCM37	Seine Poses	D	10,60	1,90	100,00	0,55	110	350	3500	4,5	4,50	3,70	0,10
LCM4	Seine Poses	D	9,40	2,00	110,00	0,80	110	430	3800	3,7	5,40	4,00	0,22
LCM5	Seine Puteaux	D	11,40	1,30	89,00	0,40	110	340	2200	4,1	5,20	4,30	0,20
LCM6	Marne Alfort	D	6,50	0,70	37,00	0,21	50	160	1800	2,6	2,00	4,70	0,09
LCM7	Ru de Gally	D	3,50	0,90	46,00	0,88	150	390	2800	1,5	5,60		0,18
LCM8	Meauldre	D	5,40	0,80	65,00	0,84	150	400	2900	2	4,80	0,80	0,18
LCM9	Eure Lery	X	5,50	3,20	120,00	0,68	500	320	2000	3	6,90	1,80	0,19
SFD1	Seine Poses	D	5,70	1,90	60,00	0,48	80	270	2600	1,8	1,30	5,60	
SFD2	Seine Jatte	D	12,80	1,20	81,00	0,39	96	280	1900	4,2	4,10	5,20	
SFD3	Marne Alfort	D	6,20	1,20	41,00	0,21	56	160	1300	2,8	1,90	4,90	
SFD4	Yonne Montereau	U	12,90	0,50	18,00	0,07	60	140	1100	3	1,60	4,00	

SFD5	Eure Lery	X	5,20	5,50	110,00	0,39	570	320	1900	3	4,50	3,30	0,10
SFD6	Seine Ivry	D	12,40	0,90	68,00	0,34	86	220	1600	4,1	3,80	4,70	
SFD7	Seine Montereau	X	6,00	1,50	83,00	0,59	110	280	710	2,7	2,70	7,00	
SFD8	Marne Anet	U	7,50	0,60	31,00	0,14	44	130	1000	3,6	2,10	4,50	
SFD9	Seine Alma	D	11,80	1,10	100,00	0,45	150	300	1600	4,3	4,80	4,60	

Annexe A. Coefficients de pondération *a*, *b* et *g* à Poses et Bercy

	alpha BERCY	alpha POSES	Beta j	Pseudo Gamma BERCY	Pseudo Gamma POSES	Gamma Bercy	Gamma Poses
limestone	0,403	0,301	1	0,403	0,301	0,22	0,161
sand/clay	0,233	0,273	3	0,699	0,819	0,38	0,437
quartz sand	0,052	0,076	0,8	0,0416	0,0608	0,02	0,032
marl	0,106	0,1	4,5	0,477	0,45	0,26	0,240
chalk	0,169	0,221	1	0,169	0,221	0,09	0,118
crystall.	0,038	0,029	0,8	0,0304	0,0232	0,02	0,012
Total	1,001	1		1,82	1,875	1,00	1,000

Annexe B. Composition minéralogique théorique des échantillons.

Sample Name	% QUARTZ	% Calcite	% MO	% CLAYS	MPI	Sample Name	% QUARTZ	% Calcite	% MO	% CLAYS	MPI
CSD27	21,1	35,0	10,5	33,45	13,3	C1lim	26,7	45,82	9,25	18,2	-0,50
CSD28	27,8	43,3	5,3	23,66	9,3	C2sand	67,9	5,83	3	23,2	-0,02
CSD29	43,7	30,0	3,5	22,84	10,2	C3 quar	78,9	0,00	3,75	17,4	-0,76
CSD32	53,2	14,2	4,5	28,17	10,5	C4 mar	45,5	24,16	5,25	25,1	0,28
CSD35	23,5	36,7	9,0	30,89	15,0	C5 chal	13,7	63,31	9,5	13,5	-1,43
CSD36	53,2	19,2	5,5	22,15	3,5	C6 cris	32,0	2,50	15,75	49,7	7,20
CSD36bis	86,7	7,5	0,8	5,01	-0,4	LCM23	22,0	28,32	10,5	39,2	23,65
CSD37	34,9	36,7	6,8	21,72	29,5	LCM24	40,1	35,82	3,5	20,6	6,77
CSD39	62,4	22,5	3,3	11,85	10,2	LCM25	24,6	34,99	8,5	31,9	20,69
CSD40	23,6	36,7	8,5	31,25	25,1	LCM26A	24,2	24,99	8,25	42,6	11,54
CSD42	39,5	38,3	3,0	19,16	27,1	LCM26B	24,2	26,66	8,25	40,9	11,90
CSD43	35,3	39,2	5,5	20,02	29,0	LCM27	34,9	39,15	5,25	20,7	17,38
CSD44	12,2	73,3	3,3	11,23	3,3	LCM28	14,3	33,32	12	40,4	15,52
CSD45fine	30,2	36,7	5,0	28,12	4,2	LCM29	20,3	35,82	9,75	34,1	18,28
CSD45coarse	43,6	43,3	2,3	10,81	2,8	LCM30	25,7	16,66	24,5	33,2	49,63
CSD46	47,0	10,8	7,5	34,71	6,1	LCM32	37,5	39,98	3,5	19,0	7,64
CSD53	17,5	33,3	14,0	35,16	38,0	LCM33	38,4	33,32	5,25	23,0	14,23
CSD53bis	33,8	37,5	7,5	21,17	29,7	LCM34	27,7	6,66	16	49,7	19,31
CSD54	29,1	14,2	17,0	39,71	94,3	LCM36	33,6	22,49	15	28,9	94,58
CSD67	10,8	58,3	7,3	23,63	2,5	LCM37	19,3	30,82	11,25	38,7	21,07
SFD1	32,6	46,6	3,3	17,48	22,7	LCM46	53,6	0,00	0,25	46,2	-1,65
SFD2	8,4	43,3	10,3	38,03	14,5	DME	64,6	2,50	5,75	27,2	3,60
SFD3	28,0	40,8	4,8	26,44	10,7	DM2	61,0	0,00	1,5	37,5	-1,40
SFD4	35,0	33,3	4,0	27,67	5,3	DM5	21,9	44,15	19	15,0	47,43
SFD5	34,2	27,5	11,3	27,08	66,2	DM11	74,3	2,50	5,25	18,0	15,81
SFD6	14,7	39,2	9,5	36,65	11,8	DM12	61,80	10,83	8,25	19,12	49,85
SFD7	10,5	58,3	6,8	24,48	20,4						
SFD8	24,1	37,5	5,3	33,17	5,1						
SFD9	11,1	38,3	12,0	38,55	18,4						
BER12	0,4	56,6	2,5	40,43	0,1						
BER51	3,8	55,8	0,8	39,63	0,3						
LCM1	32,9	13,3	26,3	27,50	54,3						
LCM2	21,6	32,5	14,0	31,96	29,4						
LCM3	34,8	13,3	11,8	40,09	20,3						
LCM4	19,1	33,3	13,5	34,06	24,9						
LCM5	14,2	35,8	13,0	37,02	17,1						
LCM6	31,5	39,2	5,0	24,34	8,3						
LCM7	68,3	6,7	11,1	13,89	31,3						
LCM8	62,7	6,7	12,0	18,63	29,1						
LCM9	40,4	15,0	17,3	27,40	55,4						
LCM10	13,6	30,8	16,3	39,29	31,1						
LCM11	41,0	34,2	6,5	18,32	7,0						
LCM12	13,1	34,2	13,8	38,96	13,8						
EB5	16,8	56,6	4,5	22,04	2,2						
EB8	74,3	2,5	1,3	21,92	-1,2						

MPI : index de pollution métallique

Annexe C. Composition chimique naturelle théorique des échantillons (en $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$).

Sample	River Station	Date	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Sb	Se	Pb	Zn	P	Co
CSD27	Seine Ivry	1994	4,91	0,20	38,6	13,4	0,038	20,4	0,45	0,53	14,6	57,7	464	5,3
CSD28	Marne Alfort	1994	4,68	0,18	35,8	11,2	0,027	19,7	0,41	0,50	14,3	51,2	339	5,2
CSD29	Yonne Montereau	1994	4,35	0,15	36,6	10,5	0,024	17,1	0,41	0,37	13,6	43,4	292	5,1
CSD32	Oise upst. Compiègne	1994	4,22	0,15	39,3	11,1	0,028	15,3	0,43	0,28	13,3	40,0	317	5,1
CSD35	Seine Alma	1994	4,84	0,19	37,9	12,8	0,035	20,1	0,44	0,52	14,5	55,6	429	5,3
CSD36	Aisne upst. Comp.	1994	4,16	0,15	36,3	10,5	0,027	14,8	0,40	0,31	12,9	41,5	312	4,9
CSD36b	Aisne upst. Comp.	1994	3,32	0,10	31,4	7,0	0,013	8,6	0,32	0,10	10,8	25,5	143	4,2
CSD37	Seine Mantes	1994	4,52	0,17	34,9	11,1	0,028	18,0	0,40	0,46	13,7	50,0	349	5,0
CSD39	Oise Cergy	1994	3,87	0,13	32,7	8,7	0,019	13,0	0,35	0,27	12,1	36,8	231	4,6
CSD40	Seine Conflans	1994	4,84	0,19	38,2	12,7	0,034	20,2	0,44	0,51	14,5	55,1	422	5,3
CSD42	Seine Mon Lafitte	1994	4,40	0,16	34,9	10,0	0,022	17,8	0,39	0,42	13,7	45,0	276	5,0
CSD43	Seine Jaitte	1994	4,49	0,17	34,5	10,6	0,026	18,1	0,39	0,46	13,7	48,8	323	5,0
CSD44	Seine Bray	1994	4,87	0,19	29,9	9,7	0,019	22,5	0,35	0,67	14,6	56,9	279	5,1
CSD45f	Marne Esbly	1994	4,68	0,17	38,0	11,6	0,028	19,6	0,43	0,46	14,4	49,6	348	5,3
CSD45	Marne Esbly grossier	1994	4,24	0,15	31,5	8,8	0,017	16,8	0,35	0,42	13,1	43,5	230	4,8
CSD46	Grand Morin	1994	4,41	0,16	41,2	12,5	0,034	16,2	0,46	0,31	13,6	44,5	395	5,2
CSD53	Seine Poses	1994	5,00	0,21	38,3	14,2	0,044	20,3	0,45	0,56	14,5	62,1	530	5,2
CSD53bis	Seine Poses	1994	4,53	0,17	34,4	11,1	0,029	18,0	0,39	0,47	13,6	51,1	360	5,0
CSD54	Eure Lery	1994	4,81	0,20	40,2	15,1	0,050	17,7	0,46	0,46	13,8	59,7	582	5,1
CSD67	Seine Romilly	1994	5,02	0,20	34,4	11,9	0,030	22,5	0,40	0,64	14,9	59,8	388	5,3
SFD1	Seine Poses	1995	4,52	0,17	33,7	10,0	0,022	19,0	0,38	0,48	13,9	48,1	281	5,1
SFD2	Seine Jatte	1995	5,21	0,21	40,1	14,1	0,040	23,0	0,47	0,61	15,5	62,1	489	5,6
SFD3	Marne Alfort	1995	4,70	0,18	37,2	11,4	0,027	20,0	0,42	0,49	14,4	50,4	341	5,3
SFD4	Yonne Montereau	1995	4,58	0,17	38,2	11,3	0,027	18,9	0,43	0,42	14,2	46,8	326	5,3
SFD5	Eure Lery	1995	4,59	0,18	36,2	12,5	0,037	17,4	0,41	0,46	13,5	53,7	441	5,0
SFD6	Seine Ivry	1995	5,07	0,20	39,9	13,7	0,038	22,0	0,46	0,57	15,1	59,0	466	5,5
SFD7	Seine Montereau	1995	5,04	0,20	34,9	11,9	0,029	22,8	0,41	0,64	15,0	59,4	383	5,3
SFD8	Marne Anet	1995	4,85	0,18	39,9	12,4	0,031	20,9	0,46	0,49	14,9	51,8	376	5,5
SFD9	Seine Alma	1995	5,16	0,21	40,0	14,4	0,042	22,2	0,47	0,59	15,2	62,5	516	5,5
BER12	Seine paleo Berçy		5,40	0,20	42,6	13,3	0,030	26,4	0,50	0,64	16,8	58,0	381	6,1
BER51	Seine paleo Berçy		5,32	0,20	42,8	12,8	0,027	26,1	0,50	0,61	16,7	55,2	347	6,1
LCM1	Orge	1996	4,62	0,21	32,7	15,1	0,058	14,3	0,39	0,51	12,1	67,7	683	4,3
LCM2	Seine Croissy	1996	4,89	0,20	37,1	13,8	0,042	19,4	0,43	0,54	14,1	60,8	514	5,1
LCM3	Yerres	1996	4,70	0,18	42,0	14,1	0,042	17,8	0,48	0,40	14,1	52,6	494	5,3
LCM4	Seine Poses	1996	4,96	0,20	38,0	14,0	0,043	20,1	0,44	0,55	14,4	61,1	516	5,2
LCM5	Seine Puteaux	1996	5,09	0,21	39,2	14,4	0,043	21,3	0,46	0,58	14,8	62,3	523	5,4
LCM6	Marne Alfort	1996	4,61	0,17	36,3	11,1	0,027	19,1	0,41	0,47	14,1	49,5	334	5,2
LCM7	Ru de Gally	1996	3,77	0,14	32,0	10,2	0,031	10,3	0,35	0,24	11,2	41,3	358	4,2
LCM8	Meauldre	1996	3,93	0,15	33,6	11,0	0,034	11,4	0,37	0,27	11,6	43,9	395	4,4
LCM9	Eure Lery	1996	4,47	0,19	35,2	13,4	0,045	14,9	0,40	0,42	12,6	56,6	532	4,6
LCM10	Seine Mantes	1996	5,12	0,22	39,5	15,2	0,048	20,8	0,46	0,58	14,7	65,2	584	5,3
LCM11	Seine Corbeil	1996	4,36	0,16	33,7	10,5	0,026	16,7	0,38	0,42	13,2	47,6	327	4,8
LCM12	Seine Ivry	1996	5,13	0,21	39,9	14,7	0,045	21,4	0,47	0,58	14,9	63,2	543	5,4
EB5	Ref. Stream	1995	4,88	0,19	34,7	11,1	0,025	21,9	0,40	0,59	14,8	55,1	332	5,3
EB8	Ref. Stream	1995	3,73	0,11	38,3	9,4	0,021	11,7	0,41	0,13	12,3	29,2	222	4,9

Annexe D. Comparaison des analyses effectuées sur les composites C1 à C6.

	Nom échant	As ppm	Cd ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Ni ppm	Sb ppm	Se ppm	Pb ppm	Zn ppm	P ppm	Co ppm
C. réelles mesurées	C1	6,6	0,2	29	7	0,02	24	0,3	0,6	16	72	650	7
C. naturelles cal.	C1	4,649	0,186	32,3	11,2	0,030	18,8	0,373	0,580	13,7	55,8	385	4,9
(Treel-Tcalc)/Tcalc	C1	0,420	0,073	-0,103	-0,377	-0,339	0,276	-0,195	0,034	0,172	0,290	0,688	0,439
Treel/Tcalc	C1	1,42	1,07	0,90	0,62	0,66	1,28	0,80	1,03	1,17	1,29	1,69	1,44
C. réelles mesurées	C2	5,0	0,2	41	7	0,01	14	0,5	0,3	19	48	470	8
C. naturelles cal.	C2	3,873	0,124	38,1	9,9	0,023	12,6	0,410	0,226	12,5	33,2	261	4,9
(Treel-Tcalc)/Tcalc	C2	0,291	0,607	0,075	-0,296	-0,574	0,112	0,219	0,329	0,524	0,446	0,798	0,639
Treel/Tcalc	C2	1,29	1,61	1,08	0,70	0,43	1,11	1,22	1,33	1,52	1,45	1,80	1,64
C. réelles mesurées	C3	2,2	0,1	30	6	0,05	9	0,3	0,2	14	28	260	5
C. naturelles cal.	C3	3,596	0,113	35,9	9,1	0,022	10,1	0,379	0,153	11,6	30,1	242	4,6
(Treel-Tcalc)/Tcalc	C3	-0,388	-0,114	-0,163	-0,344	1,252	-0,105	-0,209	0,304	0,212	-0,069	0,075	0,096
Treel/Tcalc	C3	0,61	0,89	0,84	0,66	2,25	0,89	0,79	1,30	1,21	0,93	1,07	1,10
C. réelles mesurées	C4	6,6	0,2	43	15	0,02	17	0,5	0,7	20	56	650	7
C. naturelles cal.	C4	4,341	0,156	37,3	11,0	0,027	16,5	0,415	0,406	13,5	44,0	326	5,1
(Treel-Tcalc)/Tcalc	C4	0,520	0,283	0,152	0,364	-0,270	0,033	0,205	0,723	0,486	0,272	0,992	0,383
Treel/Tcalc	C4	1,52	1,28	1,15	1,36	0,73	1,03	1,20	1,72	1,49	1,27	1,99	1,38
C. réelles mesurées	C5	1,9	0,1	14	9	0,01	37	0,2	1,3	13	51	940	4
C. naturelles cal.	C5	4,860	0,203	29,5	11,0	0,029	21,0	0,348	0,693	14,0	61,7	385	4,8
(Treel-Tcalc)/Tcalc	C5	-0,609	-0,506	-0,525	-0,179	-0,651	0,764	-0,426	0,875	-0,074	-0,174	1,439	-0,173
Treel/Tcalc	C5	0,39	0,49	0,48	0,82	0,35	1,76	0,57	1,88	0,93	0,83	2,44	0,83
C. réelles mesurées	C6	140*	1,5	24	12	0,06	10	1,0	0,4	88	100	930	8
C. naturelles cal.	C6	4,857	0,193	45,2	16,0	0,052	17,9	0,517	0,495	14,3	56,4	594	5,5
(Treel-Tcalc)/Tcalc	C6	27,825	6,769	-0,469	-0,250	0,155	-0,443	0,934	-0,192	5,149	0,773	0,566	0,464
Treel/Tcalc	C6	28,82	7,77	0,53	0,75	1,16	0,56	1,93	0,81	6,15	1,77	1,57	1,46

(*) Problème analytique

Nom échantillon	% Qz	% Calcite	% MO	% Clays	
C1	26,69	45,82	9,25	18,25	100
C2	67,95	5,83	3	23,22	100
C3	78,87	0,00	3,75	17,38	100
C4	45,49	24,16	5,25	25,10	100
C5	13,72	63,31	9,5	13,47	100
C6	32,02	2,50	15,75	49,73	100

Annexe E. Rapport de contamination (Crij = Meij / Merefij) pour chaque élément.

Sample Name	Status	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Sb	Se	Pb	Zn	P	Co
CSD27	D	2,24	3,58	1,5	5,4	8,4	1,2	3,14	2,34	6,9	4,6	3,0	1,5
CSD28	D	1,13	3,39	1,3	3,7	10,8	0,8	2,70	2,00	3,9	3,7	3,8	1,2
CSD29	U	2,39	3,23	1,1	2,0	7,49	0,9	2,46	0,95	7,7	3,8	2,8	1,2
CSD32	U	1,99	7,58	1,7	2,3	9,8	1,6	4,17	3,56	2,9	4,6	3,8	1,8
CSD35	D	1,86	4,74	1,4	5,0	8,0	1,1	3,21	2,24	7,9	5,0	3,3	1,5
CSD36	U	1,08	0,68	1,2	2,0	7,53	1,2	2,00	3,13	2,6	2,7	3,8	1,2
CSD36b	U	0,39	1,03	0,3	0,7	3,06	0,5	0,31	1,87	0,9	1,0	2,5	0,5
CSD37	D	1,39	10,49	1,5	7,2	23,5	1,3	3,80	2,00	11,7	7,1	6,3	1,2
CSD39	U	1,06	2,28	0,9	2,8	17,6	0,8	1,98	2,73	5,2	3,3	3,8	1,1
CSD40	D	1,84	7,95	1,7	7,5	21,8	1,4	4,78	2,08	10,3	6,9	4,7	1,3
CSD42	D	1,11	6,31	1,1	8,1	24,7	1,1	3,59	1,53	13,2	6,4	5,8	1,2
CSD43	D	1,36	5,34	1,3	7,2	50,6	0,9	3,86	1,81	11,7	6,1	5,6	1,2
CSD44	U	0,62	0,52	0,7	4,8	5,25	0,4	0,86	1,16	1,8	1,3	2,4	0,6
CSD45f	U	1,35	1,15	1,2	2,7	6,02	1,0	1,39	1,92	3,1	2,5	2,8	1,3
CSD45g	U	0,78	0,66	0,7	2,6	4,01	0,5	0,86	1,36	2,7	1,6	3,0	0,6
CSD46	U	1,25	0,63	1,2	4,6	7,27	1,1	1,74	4,71	3,5	2,5	1,9	1,3
CSD53	D	1,80	15,5	2,3	11,3	27,5	1,5	5,81	3,16	10,7	9,7	7,9	1,7
CSD53b	D	1,32	12,04	1,6	7,7	31,8	1,1	4,35	2,34	7,7	7,1	8,3	1,2
CSD54	X	1,43	28,1	2,2	10,2	12,1	2,0	28,6	4,99	86,8	7,4	3,4	1,9
CSD67	U	1,16	0,50	1,4	1,7	4,73	0,8	1,24	1,31	3,7	1,4	2,2	0,9
SFD1	D	1,26	11,35	1,3	6,0	22,3	0,9	2,89	2,13	5,7	5,6	9,3	1,0
SFD2	D	2,46	5,70	1,6	5,7	9,9	1,1	3,62	2,32	6,2	4,5	3,9	1,4
SFD3	D	1,32	6,82	1,2	3,6	7,71	0,8	1,89	1,85	3,9	3,2	3,8	1,1
SFD4	U	2,82	3,01	1,0	1,6	2,62	0,8	1,16	1,25	4,2	3,0	3,4	1,3
SFD5	X	1,13	30,3	1,5	8,8	10,7	1,2	14,3	4,12	42,2	6,0	4,3	1,6
SFD6	D	2,44	4,47	1,4	5,0	9,0	1,0	2,58	2,50	5,7	3,7	3,4	1,4
SFD7	U	1,19	7,46	1,2	7,0	20,2	0,7	3,18	2,32	7,3	4,7	1,9	0,8
SFD8	U	1,55	3,30	1,1	2,5	4,57	0,8	1,54	1,97	2,9	2,5	2,7	1,3
SFD9	D	2,29	5,22	1,5	6,9	10,7	1,1	13,2	2,09	9,9	4,8	3,1	1,6
BER12	B	3,13	1,47	1,1	1,1	0,67	0,7	1,41	5,25	1,4	1,7	1,7	1,0
BER51	B	1,45	2,03	1,3	0,8	0,74	0,8	1,01	1,15	1,4	1,8	0,6	0,5
LCM1	X	2,10	14,1	2,0	13,9	19,0	2,0	18,4	3,37	25,6	11,1	7,9	1,9
LCM2	X	1,84	9,40	1,7	8,7	21,5	1,5	6,48	2,96	11,3	7,6	5,8	1,6
LCM3	D	1,81	8,81	1,8	6,2	8,9	2,5	4,82	3,54	7,8	7,4	4,7	1,9
LCM4	D	1,90	9,80	1,9	7,9	18,8	1,5	4,06	3,06	7,6	7,0	7,4	1,7
LCM5	D	2,24	6,22	1,7	6,2	9,3	1,4	4,57	2,76	7,4	5,5	4,2	1,7
LCM6	D	1,41	4,07	1,2	3,3	7,85	0,9	1,94	1,74	3,5	3,2	5,4	1,2
LCM7	D	0,93	6,42	0,8	4,5	28,3	1,0	3,17	1,50	13,4	9,4	7,8	0,7
LCM8	D	1,37	5,38	1,0	5,9	24,5	1,1	4,60	1,98	12,9	9,1	7,4	0,9
LCM9	X	1,23	17,2	1,9	8,9	15,1	1,9	13,17	5,44	39,6	5,6	3,8	1,7
LCM10	D	2,05	11,57	2,2	9,2	26,8	1,8	5,82	3,17	9,6	8,3	7,0	1,9
LCM11	U	1,49	2,44	0,9	2,2	6,43	0,9	2,11	1,53	4,5	2,9	3,1	1,2
LCM12	D	2,18	3,78	1,6	6,0	7,8	1,4	3,21	3,03	6,3	5,1	3,5	1,7
EB5	B	0,86	1,06	1,0	4,0	0,80	0,6	1,25	0,63	1,4	1,4	1,1	0,4
EB8	B	1,96	0,88	1,5	0,5	0,97	1,4	2,46	0,58	1,1	1,2	0,9	1,2
C1	C	1,41	1,06	0,88	0,61	0,65	1,3	0,79	1,0918	1,16	1,28	1,7	1,422
C2	C	1,27	1,58	1,06	0,69	0,41	1,1	1,19	1,611	1,503	1,423	1,7	1,615
C3	C	0,60	0,87	0,82	0,64	2,20	0,9	0,78	1,612	1,198	0,918	1,0	1,082
C4	C	1,50	1,26	1,13	1,33	0,71	1,0	1,18	1,9269	1,466	1,256	1,9	1,363
C5	C	0,39	0,49	0,47	0,81	0,34	1,7	0,56	1,938	0,918	0,822	2,4	0,819
C6	C	28,21	7,60	0,51	0,73	1,12	0,5	1,87	0,9776	6,001	1,741	1,5	1,427
LCM23	D	2,15	7,58	1,73	6,93	35,68	1,4	4,30	3,1265	7,292	5,733	4,6	1,788
LCM24	U	1,19	2,49	1,08	3,53	6,31	1,1	1,98	1,9149	3,469	2,635	4,4	1,171
LCM25	D	1,70	9,99	1,70	6,11	14,90	1,2	3,30	2,5373	6,715	5,425	6,9	1,476
LCM26A	D	2,11	4,71	1,61	4,78	9,80	1,4	3,13	3,3674	4,871	4,044	3,8	1,729
LCM26B	D	2,02	5,76	1,60	4,64	8,96	1,4	2,59	3,1167	4,771	3,852	3,7	1,745
LCM27	D	1,25	5,86	1,21	5,23	14,46	0,9	3,99	2,8038	7,897	4,269	5,2	1,176
LCM28	U	2,54	4,76	1,66	6,40	7,26	1,3	2,84	2,619	7,147	5,169	3,9	1,772
LCM29	D	1,64	6,06	1,60	7,01	12,02	1,2	4,32	2,7685	7,353	5,175	4,3	1,643
LCM30	X	2,39	10,86	2,10	15,66	16,06	1,9	21,46	5,2992	22,79	11,13	6,9	2,325
LCM32	U	0,94	3,66	1,02	3,38	6,06	0,7	1,77	1,5761	3,747	2,355	4,8	0,981
LCM33	U	1,64	4,80	1,09	5,12	11,37	0,9	5,56	1,8733	6,124	4,203	4,2	1,362
LCM34	U	2,14	8,38	2,01	6,02	7,09	2,7	5,06	4,0536	6,738	8,251	4,4	2,487
LCM36	X	1,05	21,85	1,73	8,06	9,21	1,4	18,81	4,6586	89,03	5,016	3,5	1,821
LCM37	D	2,09	9,38	1,87	6,87	13,00	1,4	3,72	2,9766	7,276	5,895	6,9	1,795
LCM46	HS	0,38	0,71	0,80	0,39	1,00	1,1	0,37	0,486	1,473	0,91	0,8	1,34
DME	U	1,11	2,93	1,10	1,34	2,69	1,2	1,38	1,9377	2,664	2,497	2,7	1,602
DM2	B	0,97	0,75	1,09	0,50	2,13	0,9	0,80	1,091	1,147	1,029	0,8	1,08
DM5	D	1,03	11,73	4,52	14,11	19,03	3,3	11,08	13,83	12,42	14,13	8,7	2,26

DM11	D	1,28	4,87	1,05	5,02	14,34	1,0	3,36	3,6891	5,761	5,053	5,0	1,083
DM12	X	1,32	9,71	1,25	13,12	54,03	1,5	18,37	2,2566	18,87	9,941	16,9	1,292

D = Downstream (or within) Paris, U = Upstream, B = Background, X = Specific industrial pollution.
CR = 1.00 means no contamination with regards to the theoretical values. HS = Hors Seine

Annexe F. Indice de pollution PI_j et indicateur de pollution métallique (MPI).

Sample	←-----PI (1)----->											[2]	
	As ppm	Cd ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Ni ppm	Sb ppm	Se ppm	Pb ppm	Zn ppm	P ppm	Co ppm	MPI
CSD27	1,2	2,6	0,5	4,4	7,4	0,2	2,1	1,6	5,9	3,6	2,0	0,5	23,8
CSD28	0,1	2,4	0,3	2,7	9,8	-0,2	1,7	1,2	2,9	2,7	2,8	0,2	20,5
CSD29	1,4	2,2	0,1	1,0	6,5	-0,1	1,5	0,1	6,7	2,8	1,8	0,2	19,2
CSD32	1,0	6,6	0,7	1,3	8,8	0,6	3,2	3,3	1,9	3,6	2,8	0,8	22,3
CSD35	0,9	3,7	0,4	4,0	7,0	0,1	2,2	1,5	6,9	4,0	2,3	0,5	25,7
CSD36	0,1	-0,3	0,2	1,0	6,5	0,2	1,0	2,6	1,6	1,7	2,8	0,2	10,5
CSD36bis	-0,6	0,0	-0,7	-0,3	2,1	-0,5	-0,7	1,1	-0,1	0,0	1,5	-0,5	1,7
CSD37	0,4	9,5	0,5	6,2	22,5	0,3	2,8	1,2	10,7	6,1	5,3	0,2	55,0
CSD39	0,1	1,3	-0,1	1,8	16,6	-0,2	1,0	2,0	4,2	2,3	2,8	0,1	26,1
CSD40	0,8	6,9	0,7	6,5	20,8	0,4	3,8	1,3	9,3	5,9	3,7	0,3	49,5
CSD42	0,1	5,3	0,1	7,1	23,7	0,1	2,6	0,7	12,2	5,4	4,8	0,2	53,7
CSD43	0,4	4,3	0,3	6,2	49,6	-0,1	2,9	1,0	10,7	5,1	4,6	0,2	76,0
CSD44	-0,4	-0,5	-0,3	3,8	4,3	-0,6	-0,1	0,2	0,8	0,3	1,4	-0,4	8,7
CSD45f	0,3	0,2	0,2	1,7	5,0	0,0	0,4	1,2	2,1	1,5	1,8	0,3	10,4
CSD45g	-0,2	-0,3	-0,3	1,6	3,0	-0,5	-0,1	0,4	1,7	0,6	2,0	-0,4	6,6
CSD46	0,2	-0,4	0,2	3,6	6,3	0,1	0,7	4,8	2,5	1,5	0,9	0,3	13,5
CSD53	0,8	14,5	1,3	10,3	26,5	0,5	4,8	2,6	9,7	8,7	6,9	0,7	69,6
CSD53b	0,3	11,0	0,6	6,7	30,8	0,1	3,3	1,6	6,7	6,1	7,3	0,2	61,4
CSD54	0,4	27,1	1,2	9,2	11,1	1,0	27,6	4,8	85,8	6,4	2,4	0,9	139,6
CSD67	0,2	-0,5	0,4	0,7	3,7	-0,2	0,2	0,4	2,7	0,4	1,2	-0,1	7,0
SFD1	0,3	10,4	0,3	5,0	21,3	-0,1	1,9	1,3	4,7	4,6	8,3	0,0	46,0
SFD2	1,5	4,7	0,6	4,7	8,9	0,1	2,6	1,6	5,2	3,5	2,9	0,4	27,0
SFD3	0,3	5,8	0,2	2,6	6,7	-0,2	0,9	1,1	2,9	2,2	2,8	0,1	20,2
SFD4	1,8	2,0	0,0	0,6	1,6	-0,2	0,2	0,4	3,2	2,0	2,4	0,3	9,4
SFD5	0,1	29,3	0,5	7,8	9,7	0,2	13,3	3,6	41,2	5,0	3,3	0,6	92,9
SFD6	1,4	3,5	0,4	4,0	8,0	0,0	1,6	1,8	4,7	2,7	2,4	0,4	22,8
SFD7	0,2	6,5	0,2	6,0	19,2	-0,3	2,2	1,5	6,3	3,7	0,9	-0,2	41,7
SFD8	0,5	2,3	0,1	1,5	3,6	-0,2	0,5	1,2	1,9	1,5	1,7	0,3	10,8
SFD9	1,3	4,2	0,5	5,9	9,7	0,1	12,2	1,4	8,9	3,8	2,1	0,6	32,5
BER12	2,1	0,5	0,1	0,1	-0,3	-0,3	0,4	4,9	0,4	0,7	0,7	0,0	1,4
BER51	0,4	1,0	0,3	-0,2	-0,3	-0,2	0,0	0,3	0,4	0,8	-0,4	-0,5	1,8
LCM1	1,1	13,1	1,0	12,9	18,0	1,0	17,4	2,7	24,6	10,1	6,9	0,9	78,7
LCM2	0,8	8,4	0,7	7,7	20,5	0,5	5,5	2,3	10,3	6,6	4,8	0,6	53,5
LCM3	0,8	7,8	0,8	5,2	7,9	1,5	3,8	3,3	6,8	6,4	3,7	0,9	34,1
LCM4	0,9	8,8	0,9	6,9	17,8	0,5	3,1	2,4	6,6	6,0	6,4	0,7	46,1
LCM5	1,2	5,2	0,7	5,2	8,3	0,4	3,6	2,1	6,4	4,5	3,2	0,7	29,6
LCM6	0,4	3,1	0,2	2,3	6,9	-0,1	0,9	0,9	2,5	2,2	4,4	0,2	17,0
LCM7	-0,1	5,4	-0,2	3,5	27,3	0,0	2,2	0,7	12,4	8,4	6,8	-0,3	57,1
LCM8	0,4	4,4	0,0	4,9	23,5	0,1	3,6	1,3	11,9	8,1	6,4	-0,1	52,9
LCM9	0,2	16,2	0,9	7,9	14,1	0,9	12,2	5,1	38,6	4,6	2,8	0,7	81,5
LCM10	1,1	10,6	1,2	8,2	25,8	0,8	4,8	2,6	8,6	7,3	6,0	0,9	60,4
LCM11	0,5	1,4	-0,1	1,2	5,4	-0,1	1,1	0,7	3,5	1,9	2,1	0,2	13,6
LCM12	1,2	2,8	0,6	5,0	6,8	0,4	2,2	2,4	5,3	4,1	2,5	0,7	24,0
EB5	-0,1	0,1	0,0	3,0	-0,2	-0,4	0,2	-0,3	0,4	0,4	0,1	-0,6	3,7
EB8	1,0	-0,1	0,5	-0,5	0,0	0,4	1,5	-0,2	0,1	0,2	-0,1	0,2	-0,3
C1	0,41	0,06	-0,12	-0,39	-0,35	0,25	-0,21	0,09	0,16	0,28	0,66	0,42	-0,2
C2	0,27	0,58	0,06	-0,31	-0,59	0,08	0,19	0,61	0,50	0,42	0,75	0,62	0,6
C3	-0,40	-0,13	-0,18	-0,36	1,20	-0,13	-0,22	0,61	0,20	-0,08	0,05	0,08	0,8
C4	0,50	0,26	0,13	0,33	-0,29	0,01	0,18	0,93	0,47	0,26	0,94	0,36	1,0
C5	-0,61	-0,51	-0,53	-0,19	-0,66	0,74	-0,44	0,94	-0,08	-0,18	1,41	-0,18	-1,6
C6	27,21	6,60	-0,49	-0,27	0,12	-0,47	0,87	-0,02	5,00	0,74	0,52	0,43	12,2
LCM23	1,15	6,58	0,73	5,93	34,68	0,42	3,30	2,13	6,29	4,73	3,64	0,79	58,2
LCM24	0,19	1,49	0,08	2,53	5,31	0,05	0,98	0,91	2,47	1,63	3,40	0,17	13,4
LCM25	0,70	8,99	0,70	5,11	13,90	0,17	2,30	1,54	5,72	4,42	5,92	0,48	38,1
LCM26A	1,11	3,71	0,61	3,78	8,80	0,45	2,13	2,37	3,87	3,04	2,83	0,73	23,2
LCM26B	1,02	4,76	0,60	3,64	7,96	0,36	1,59	2,12	3,77	2,85	2,66	0,75	23,0
LCM27	0,25	4,86	0,21	4,23	13,46	-0,14	2,99	1,80	6,90	3,27	4,17	0,18	32,7
LCM28	1,54	3,76	0,66	5,40	6,26	0,34	1,84	1,62	6,15	4,17	2,95	0,77	25,7
LCM29	0,64	5,06	0,60	6,01	11,02	0,22	3,32	1,77	6,35	4,18	3,29	0,64	32,6
LCM30	1,39	9,86	1,10	14,66	15,06	0,95	20,46	4,30	21,79	10,13	5,93	1,33	71,5
LCM32	-0,06	2,66	0,02	2,38	5,06	-0,29	0,77	0,58	2,75	1,36	3,80	-0,02	14,2
LCM33	0,64	3,80	0,09	4,12	10,37	-0,12	4,56	0,87	5,12	3,20	3,19	0,36	26,6
LCM34	1,14	7,38	1,01	5,02	6,09	1,71	4,06	3,05	5,74	7,25	3,37	1,49	31,5
LCM36	0,05	20,85	0,73	7,06	8,21	0,39	17,81	3,66	88,03	4,02	2,48	0,82	128,2
LCM37	1,09	8,38	0,87	5,87	12,00	0,40	2,72	1,98	6,28	4,90	5,89	0,80	37,4
LCM46	-0,62	-0,29	-0,20	-0,61	0,00	0,06	-0,63	-0,51	0,47	-0,09	-0,24	0,34	-0,5
DME	0,11	1,93	0,10	0,34	1,69	0,20	0,38	0,94	1,66	1,50	1,74	0,60	7,1

DM2	-0,03	-0,25	0,09	-0,50	1,13	-0,10	-0,20	0,09	0,15	0,03	-0,15	0,08	0,6
DM5	0,03	10,73	3,52	13,11	18,03	2,28	10,08	12,83	11,42	13,13	7,70	1,26	66,4
DM11	0,28	3,87	0,05	4,02	13,34	0,00	2,36	2,69	4,76	4,05	4,02	0,08	30,0
DM12	0,32	8,71	0,25	12,12	53,03	0,49	17,37	1,26	17,87	8,94	15,87	0,29	100,7

Negative values mean that theoretical content is overestimated.

(1) $PI = \frac{\text{Measured content} - \text{theor. content}}{\text{theor content}}$

(2) $MPI_w = PICd + PICu + PIPb + PIZn + 1/8PIHg$

$MPI = PICd + PICu + PIPb + PIZn + PIHg$

Annexe G. Composition théorique des sédiments fluviaux moyens à Poses et à Bercy.

Sample Name	River Station	Gam Bercy	Gam Poses	As ppm	Cd ppm	Cr ppm	Cu ppm	Hg ppm	Ni ppm	Sb ppm	Se ppm	Pb ppm	Zn ppm	P ppm	Co ppm
C1	Comp. Limestone	0,220	0,161	6,60	0,20	29,00	7,00	0,02	24,00	0,30	0,60	16,00	72	650	7,00
	Bercy			1,45	0,04	6,38	1,54	0,00	5,28	0,07	0,13	3,52	15,8	143,0	1,54
	Poses			1,06	0,03	4,67	1,13	0,00	3,86	0,05	0,10	2,58	11,6	104,7	1,13
C2	Comp. Sand/clay	0,380	0,537	5,00	0,20	41,00	7,00	0,01	14,00	0,50	0,30	19,00	48	470	8,00
	Bercy			1,90	0,08	15,58	2,66	0,00	5,32	0,19	0,11	7,22	18,2	178,6	3,04
	Poses			2,69	0,11	22,02	3,76	0,01	7,52	0,27	0,16	10,20	25,8	252,4	4,30
C3	Comp. Qz sand	0,020	0,032	2,20	0,10	30,00	6,00	0,05	9,00	0,30	0,20	14,00	28	260	5,00
	Bercy			0,04	0,00	0,60	0,12	0,00	0,18	0,01	0,00	0,28	0,6	5,2	0,10
	Poses			0,07	0,00	0,96	0,19	0,00	0,29	0,01	0,01	0,45	0,9	8,3	0,16
C4	Comp. Marl	0,260	0,240	6,60	0,20	43,00	15,00	0,02	17,00	0,50	0,70	20,00	56	650	7,00
	Bercy			1,72	0,05	11,18	3,90	0,01	4,42	0,13	0,18	5,20	14,6	169,0	1,82
	Poses			1,58	0,05	10,32	3,60	0,00	4,08	0,12	0,17	4,80	13,4	156,0	1,68
C5	Comp. Chalk	0,090	0,180	1,90	0,10	14,00	9,00	0,01	37,00	0,20	1,30	13,00	51	940	4,00
	Bercy			0,17	0,01	1,26	0,81	0,00	3,33	0,02	0,12	1,17	4,59	84,6	0,36
	Poses			0,34	0,02	2,52	1,62	0,00	6,66	0,04	0,23	2,34	9,18	169,2	0,72
C6	Comp. Cristall.	0,020	0,012	140,00	1,50	24,00	12,00	0,06	10,00	1,00	0,40	88,00	100	930	8,00
	Bercy			2,80	0,03	0,48	0,24	0,00	0,20	0,02	0,01	1,76	2,00	18,6	0,16
	Poses			1,68	0,02	0,29	0,14	0,00	0,12	0,01	0,00	1,06	1,20	11,2	0,10
Bercy				8,08	0,21	35,5	9,27	0,017	18,7	0,43	0,56	19,2	55,8	599	7,02
Poses				7,42	0,23	40,8	10,4	0,018	22,5	0,49	0,67	21,4	62,1	702	8,08

(sur la base des % lithologie et des érodabilités relatives)

Sample Name	River Station	Gam Bercy	Gam Poses	Ba ppm	V ppm	Li ppm	Be ppm	Sr ppm	Fe %	Mn ppm	Al %	Ti %	POC %	PIC %
C1	Comp. Limestone	0,220	0,161	140	39,00	21,00	0,60	140	1,30	210	2,10	0,17	3,70	5,5
	Bercy			30,8	8,58	4,62	0,13	30,8	0,29	46,2	0,46	0,04	0,81	1,21
	Poses			22,5	6,28	3,38	0,10	22,5	0,21	33,8	0,34	0,03	0,60	0,8855
C2	Comp. Sand/clay	0,380	0,537	270	36,00	19,00	0,80	110	1,40	670	2,70	0,31	1,20	0,7
	Bercy			102,6	13,68	7,22	0,30	41,8	0,53	254,6	1,03	0,12	0,46	0,266
	Poses			145,0	19,33	10,20	0,43	59,1	0,75	359,8	1,45	0,17	0,64	0,3759
C3	Comp. Qz sand	0,020	0,032	170	29,00	10,00	0,60	57	1,10	180	2,00	0,28	1,50	0
	Bercy			3,4	0,58	0,20	0,01	1,1	0,02	3,6	0,04	0,01	0,03	0
	Poses			5,4	0,93	0,32	0,02	1,8	0,04	5,8	0,06	0,01	0,05	0
C4	Comp. Marl	0,260	0,240	220	45,00	26,00	0,90	290	1,70	450	2,90	0,26	2,10	2,9
	Bercy			57,2	11,70	6,76	0,23	75,4	0,44	117,0	0,75	0,07	0,55	0,754
	Poses			52,8	10,80	6,24	0,22	69,6	0,41	108,0	0,70	0,06	0,50	0,696
C5	Comp. Chalk	0,090	0,180	120	21,00	12,00	0,40	430	0,70	210	1,60	0,12	3,80	7,6
	Bercy			10,8	1,89	1,08	0,04	38,70	0,06	18,9	0,14	0,01	0,34	0,684
	Poses			21,6	3,78	2,16	0,07	77,40	0,13	37,8	0,29	0,02	0,68	1,368
C6	Comp. Cristall.	0,020	0,012	430	34,00	90,00	8,80	73,0	2,30	1100	6,00	0,26	6,30	0,3
	Bercy			8,6	0,68	1,80	0,18	1,46	0,05	22,0	0,12	0,01	0,13	0,006
	Poses			5,2	0,41	1,08	0,11	0,88	0,03	13,2	0,07	0,00	0,08	0,0036
Bercy				213	37,1	21,7	0,89	189	1,39	462	2,55	0,24	2,31	2,92
Poses				253	41,5	23,4	0,94	231	1,56	558	2,91	0,29	2,55	3,329

Annexe H. *Protocoles d'analyses (Horowitz et al, 1989. Hydrological Processes. 3, 347-364).*

500 mg sont digérés totalement dans HF/H à 2 % . Les analyses ont été faites par spectrométrie d'émission atomique couplée à une torche à plasma (ICP – AES) sauf Hg analysé par la méthode de vapeur froide après attaque à 100 °C à l'eau régale de Lefort. La précision et les biais ne dépassent pas 10 %, elles ont été déterminées par l'analyse concomitante des standards NIST et USGS (roches et sols).

Sommaire  général

Introduction du thème : Micropolluants urbains

**Indicateurs de contamination métallique dans le bassin de la
Seine : principe et application aux sédiments de crue**

**Retombées atmosphériques de métaux et produits organiques
persistants (POP)**

**Contamination des eaux usées de l'agglomération parisienne
par les micropolluants poly-aromatiques : HAP et PCB**

**Mobilisation de polluants lors de la mise en dépôt de
sédiments fluviaux contaminés**