



Les réponses

de la société à la pollution métallique

La contamination d'un bassin versant étendu et soumis à des activités humaines multiples peut faire l'objet d'un examen à une époque déterminée, par exemple le début du XXI^e siècle, dans le but d'appliquer la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE).



Répondre aux questions clés « pourquoi ? », « comment ? », « qui ? », « quand ? » ou « combien ? » nécessite de combiner des analyses chimiques sur le milieu naturel avec des informations de nature très variée sur ce que l'on peut appeler anthroposystème*.

Certains économistes de l'environnement parlent alors d'une approche « globale » DPSIR distinguant :

- les facteurs de contrôle des usages des matériaux (« Drivers », D) ;
- les pressions (« Pressures », P) exercées sur le milieu naturel (rejets, fuites vers le sol, l'eau et l'atmosphère) ;
- l'état du milieu (« State », S) ;
- les impacts (« Impact », I) multiples sur les organismes du milieu naturel, sur la santé humaine et animale et sur l'économie (y compris la non-utilisation du milieu pour certains usages, du fait de sa contamination) ;
- les réponses (« Responses », R) apportées par l'ensemble de la société pour faire face à la contamination et à ses impacts.

L'approche DPSIR suppose une certaine succession logique. Par exemple, les réponses sont abordées lorsque les impacts sont connus ou quand l'état s'est dégradé au-delà d'une limite préfixée (standards).

En fait, l'intérêt des sociétés pour l'environnement et le développement des connaissances scientifiques et techniques en cette matière est relativement nouveau. Il est donc très courant d'être confronté à des « pollutions orphelines » liées à des activités très anciennes pour lesquelles les impacts passés n'ont parfois pas été décelés, mais dont les impacts présents, réels ou potentiels, sont tels qu'ils nécessitent aujourd'hui une réponse. La mise en œuvre de celle-ci s'étendra parfois sur des décennies.

Il en est ainsi par exemple pour les grands sites miniers et industriels impliquant une restauration des sols des sites pollués et pour les sédiments dragués dans le lit fluvial, qui sont aujourd'hui considérés comme des matériaux dangereux, nécessitant un traitement ou une sécurisation dans des sites appropriés.

De même que l'usage de métaux (D et P) est en constante évolution, la vision d'une société sur ses problèmes environnementaux (R) est aussi très dynamique et se traduit notamment par un arsenal, en

constante évolution, de critères d'usages, de standards de rejets, d'objectifs de qualité, de listes de produits dangereux ou à surveiller. Il dépend beaucoup des connaissances scientifiques, du développement des problèmes environnementaux et du consensus social sur le prix environnemental à payer, par exemple, pour assurer une croissance économique ou un plein emploi.

L'approche DPSIR présente donc des contours continuellement changeants avec les époques et les lieux, mais elle permet de déchiffrer les multiples interactions entre l'Homme et son milieu, celui-ci étant de plus en plus modifié et régulé, à tel point que certains parlent d'un nouveau temps géologique, l'anthropocène* – terme lancé par le prix Nobel de chimie de l'atmosphère, Paul Crutzen – où l'action de l'Homme devient prépondérante sur les facteurs de contrôle naturels du milieu. Ce concept s'applique très bien à la contamination métallique du bassin de la Seine.

Les facteurs de contrôle économique, les pressions et les réponses doivent être considérés pour un temps assez long pour percevoir l'évolution lente à la fois des milieux et des sociétés, et leurs interactions. Rappelons que les temps de séjour et de réponse des milieux naturels peuvent être courts (heures, jours ou semaines) pour l'atmosphère, mais beaucoup plus longs pour les eaux de surface (semaines à années), souterraines (un à cent ans) et les sols et les plaines alluviales et lits fluviaux (cent à mille ans et plus).

Nous nous sommes attachés ici aux cinquante dernières années, ce qui pose trois problèmes :

- le manque de surveillance des milieux aquatiques avant les années 1970. Il a fallu attendre 1983 pour avoir le premier réseau de mesure des métaux dans les sédiments ;
- l'évaluation encore plus tardive des pressions éventuellement mal adaptée au cas individuel de chaque métal ;
- l'absence de données d'usage des métaux, collectées dans un but environnemental souvent agrégées au niveau national.

Ce défaut de données n'est pas spécifique au bassin de la Seine, mais concerne l'ensemble des bassins fluviaux français. Il nous a donc fallu effectuer un certain nombre d'hypothèses pour dégrouper ou regrouper les informations à notre disposition provenant de statistiques économiques nationales de

L'INSEE, de nombreux ministères avec des données spécifiques sur le bassin recueillies par l'Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN), la DIREN, le PIREN-Seine ou certaines institutions comme le SIAAP ou encore les producteurs d'eau potable...

Le métox* est une illustration du deuxième type de problème de l'inadaptation des données de pression lorsqu'elles ont été conçues et utilisées pour d'autres usages, ici le calcul de redevances. Chaque rejet en métox (kg/an) est calculé sur la base du type d'activité industrielle, d'un indicateur de production, comme le nombre de voitures produites par an, et d'un ratio de quantité de chaque métal rejeté dans le milieu par type d'activité et par unité de production. Ce ratio a été établi pour chaque type d'activité et de collectivité en 1992 et il est contrôlé par des mesures de rejets métalliques sur les sites de production. Le métox qui a pour vocation le calcul de redevances, ne permet pas d'évaluer des pressions (P) pour des métaux pris individuellement car les mesures réellement effectuées sur chaque métal ne sont pas encore stockées dans des banques de données. Les rejets de métox liés à un émetteur (P) sont donc parfois théoriques, généralement non décomposables en métaux et non actualisés. Ils n'ont donc pas été utilisés ici.

Une étude a été conduite en 2004 par l'AESN afin de décomposer les flux annuels de métox, correspondant aux redevances payées en 2002 par un échantillon* de 320 sites représentatif de plus de 2000 sites industriels, en ses composantes métalliques. Les flux métalliques ainsi estimés sont, à part pour l'arsenic, significativement supérieurs à ceux présentés au [tableau 4, page 37](#) (7 à 34 fois plus élevés). Cette démarche intéressante n'a malheureusement pas été reconduite ultérieurement afin d'identifier l'origine de ces différences.

Dans le cadre de l'application de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE*), le ministère chargé de l'environnement a, depuis 2003, lancé un important chantier de mesures ponctuelles des flux moyens émis pendant 24 h pour tous les micropolluants à surveiller, dont les métaux. Lorsque sera réalisée la mise en banque de données des résultats des contrôles réguliers effectués sur les rejets industriels par l'Inspection des Installations Classées et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, nous disposerons d'un recensement beaucoup plus fin des rejets de chaque métal : il faudra néanmoins s'attacher à démontrer la représentativité temporelle sur toute l'année des échantillons ainsi collectés.

La précision des mesures de flux de métaux rejetés par les industries demeure inconnue : les prélèvements sont généralement faits pendant 24 h, seulement quelques fois par an. Ces mesures peuvent donc ne pas être représentatives de la variabilité journalière des flux qui dépendent de l'activité industrielle. Dans le milieu naturel, la précision des flux de matière transportée par les fleuves est aussi très variable en fonction de l'hydrologie et du régime de transport des matières en suspension : on peut l'estimer entre 10 et 50%, suivant les métaux mesurés à une fréquence mensuelle, dans le cas d'une station peu variable comme celle sur la Seine à Poses. Tant pour les rejets industriels que pour le milieu naturel, les coûts d'une surveillance adéquate sont énormes : il convient donc de sélectionner avec soin les stations concernées par ces flux.

Lorsque l'on suit le schéma d'analyse DPSIR, il apparaît clairement qu'il n'y a pas de relation de cause à effet entre les états (S), les impacts (I) et la réponse sociétale (R). Le maximum de dégradation du milieu s'est produit entre 1950 et 1960. Les impacts qui lui sont liés sont passés totalement inaperçus à cette époque et les réponses n'ont été apportées qu'à partir de la fin des années 1970 et se sont graduellement développées jusqu'à l'époque actuelle, avec un intérêt accru pour les micropolluants en raison de l'application de la DCE à partir de 2000. La réponse sociétale a donc été très tardive et progressive : les standards d'usages du milieu (sols, matériaux de dragage) et de rejets (eaux usées, boues) ont été divisés par un facteur dix pour certains métaux comme le cadmium. Les recherches spécifiques ne se sont développées que depuis 15 ans dans le cadre des programmes PIREN-Seine et Seine-Aval, grâce au soutien de l'ensemble des acteurs du bassin et de l'estuaire.

Des pressions élevées sur un monde sensible

Par son urbanisation, sa densité de population (250 hab/km²) et sa forte activité industrielle estimée à au moins 30% de la valeur nationale, le bassin de la Seine a depuis des décennies été exposé à des pressions humaines énormes alors que la capacité de dilution de la Seine est par contre faible à très faible, comparée aux autres fleuves français et mondiaux (tableau 5, page 47). Le débit à l'étiage, sans le soutien des barrages-réservoirs, descend à 40 m³/s et les niveaux de matières en suspension en dehors des crues, sont généralement inférieurs à 20 mg/l. Comme les métaux ont une grande affinité pour la matière particulaire, la Seine se trouve donc très contaminée, plus que le Rhône, la Garonne ou la Loire, à pression humaine identique.

Malgré cette sensibilité structurelle à la pollution, une décontamination significative a été observée de 1960 à 2005 sur le bassin de la Seine, comme sur les fleuves les plus contaminés en Europe de l'Ouest (figure 21, page 47).

En première analyse, on peut attribuer cette évolution de la Seine à des facteurs multiples à effet cumulatifs et concordants (tableau 6, page 53) :

- la désindustrialisation progressive du bassin fluvial (en amont de Poses). Elle s'exerce sur Paris *intra muros* pour des activités spécifiques comme le traitement de surface, puis sur la Petite et la Grande couronne parisienne ;
- le changement des procédés industriels, par exemple la diminution de l'usage d'électrodes de mercure dans l'industrie chimique, usage qui avait abouti à une contamination avérée de l'Oise dans les années 1970 ;
- la mise en place, à l'initiative notamment de l'Agence de l'eau Seine-Normandie dès la fin des années 1970 :
 - de procédés de recyclage des produits métalliques, comme les bains utilisés en traitement de surface, et d'épuration des eaux usées industrielles à leur source (précipitation, échange d'ions, électrolyse...);
 - de centres de traitement des déchets toxiques (notamment bains et boues contenant des métaux);
 - de l'envoi par les industriels de leurs déchets toxiques dans les filières satisfaisantes nouvellement créées (politique fortement incitative de l'« aide à la tonne »).

- le développement, à partir des années 80, du traitement des eaux usées urbaines et surtout du prétraitement des effluents industriels avant rejet aux réseaux urbains, à la suite de la forte progression, à partir des années 60, de la connexion des rejets industriels aux réseaux urbains ; les matières en suspension industrielles, mélangées aux particules urbaines (ruissellement des eaux pluviales) et domestiques, ont sans doute été à l'origine des contaminations très fortes des boues d'épuration, dans les années 1960-1980 ;
- chaque métal est caractérisé par une trajectoire d'usage général qui lui est propre, mais qui ne permet toutefois pas de comprendre l'origine des contaminations. Il faudrait pour cela connaître les usages spécifiques de chacun dans l'industrie, le bâtiment, les transports... et leurs formes chimiques particulières (dissous comparé à particulaire, oxydes comparés aux métaux, labile* comparé à réfractaire...), ainsi que les fuites dans l'environnement relatives à chaque usage ; la modélisation de la contamination environnementale à partir des seuls usages est donc très complexe et mal documentée.

La Seine d'aujourd'hui reste très contaminée par rapport à la moyenne des fleuves mondiaux à l'état naturel, surtout pour le mercure et le cadmium. En revanche, les teneurs en nickel, chrome et cobalt sont équivalentes aux références naturelles mondiales. En comparant les archives sédimentaires depuis 1935 (figure 19, page 44) avec la demande générale en métaux, il apparaît que le taux de fuite* des métaux à l'exutoire du bassin de la Seine, par rapport aux quantités utilisées sur le bassin est très variable selon les métaux : du cuivre, au plomb, zinc, cadmium et au mercure, par ordre croissant du taux de fuite. Ce taux a été divisé par dix depuis 1950 pour tous les métaux, par exemple de 2 à 0,2% environ pour le plomb, mais il reste de 10 à 20% pour le mercure, dont l'usage est beaucoup plus faible. Cette valeur élevée du taux de fuite du mercure est probablement liée à sa faible utilisation actuelle.

Malgré une augmentation de la population du bassin de la Seine d'environ 50% en 50 ans - croissance bien supérieure à celle de la population française - la quantité de métaux en excès, par rapport aux flux naturels, rapportée à la population en gramme par habitant, a généralement été également divisée par dix (figure 22, page 52). De même les flux annuels de métox* correspondant aux redevances payées par les industriels du bassin, tant pour leur rejets en rivière qu'en réseau d'assainissement, ont, tous deux, diminué d'environ 50% entre 1994 et 2006.

CONCLUSION

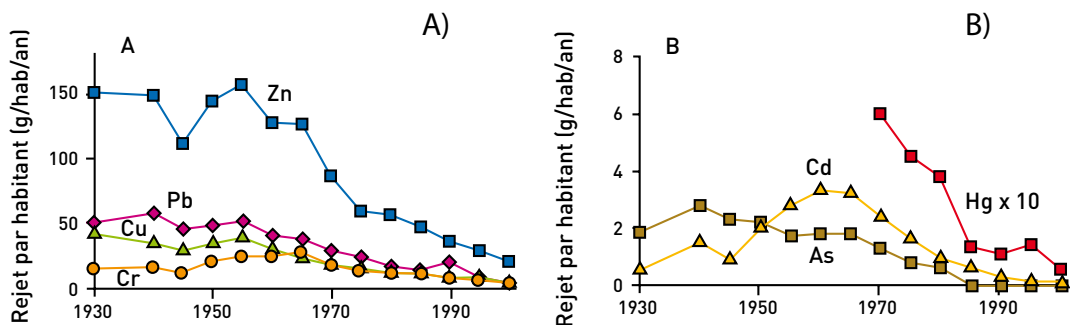


Figure 22 : Évolution comparée de l'estimation des rejets annuels dans le bassin de la Seine, en gramme par habitant et par an : (A) cuivre, chrome, plomb et zinc, (B) arsenic, cadmium et mercure. (échelle multipliée par 10 pour le mercure).

Le problème majeur : gérer l'héritage

La décontamination du bassin de la Seine sera-t-elle achevée en 2015 pour satisfaire la Directive Cadre européenne sur l'Eau ? La réponse est, bien sûr, nuancée et dépend en partie du bassin considéré.

À l'amont de Paris, le chevelu hydrographique des petits bassins est, dans l'ensemble, peu voire même non contaminé. Toutefois le mercure qui peut être apporté par voie atmosphérique et le cadmium, contenu dans les engrais phosphatés, peuvent y être d'une teneur supérieure au bruit de fond naturel*. La contamination modérée est surtout générée par les villes moyennes.

À l'aval de l'agglomération parisienne, la contamination fluviale est importante. Si on extrapole l'évolution actuelle à 2015, il est douteux que l'on arrive aux valeurs de bruit de fond naturel qui sont parmi les plus faibles du monde en raison de la prépondérance de roches sédimentaires carbonatées. La contamination des sédiments, forte pour le cadmium et le mercure, moyenne pour le plomb et le zinc, subsistera vraisemblablement.

On peut également trouver, dans le lit fluvial et dans les ports, des sédiments très contaminés résultant d'apports très anciens. Aujourd'hui, leur gestion ne va pas sans problème. S'ils doivent être retirés du fleuve à l'occasion d'un dragage ou d'un recalibrage, ils deviennent en effet des « déchets » selon les normes en vigueur et ne peuvent être remis à l'eau. Il est très difficile d'envisager de réaliser un dragage complet des sédiments contaminés. Celui-ci aurait par ailleurs des impacts sur l'habitat aquatique.

Le diagnostic de la contamination métallique sur le bassin de la Seine (tableau 6) et donc sa gestion, dépendent de facteurs multiples :

- Où se trouve la station considérée ?
- Quelle est la période considérée ?
- Quel est le métal ciblé ?
- Porte-t-on un diagnostic absolu, basé sur le bruit de fond naturel, ici très bas, ou un diagnostic relatif, basé sur l'efficacité de la société à réduire les taux de fuite* en produits toxiques, compte tenu du type et des niveaux d'activités économiques développées à la station considérée, et de ce que l'écosystème peut accepter sans trop de dommages ?
- Que considère-t-on pour les flux de métaux transportés à la zone côtière, les flux absolus, ou les flux rapportés à la superficie du bassin ?

Les réponses à ces questions doivent maintenant être apportées par les acteurs et les usagers du bassin, compte tenu des points suivants (tableau 6) :

- à l'aval de Paris, la Seine est structurellement très fragile, au vu de sa faible capacité de dilution des polluants dissous ou fixés sur des particules ;
- le principe d'auto-épuration, qui a fondé pendant des décennies la gestion des fleuves, ne s'applique pas pour les métaux : bien au contraire, la contamination des particules des sols, du lit fluvial, des sédiments alluviaux et des anciennes décharges peut être héritée d'activités économiques remontant à plusieurs décennies ;
- il convient donc d'identifier, de sécuriser ou traiter, de surveiller ces zones à risques dont certaines (décharges, anciens sites industriels) nous sont encore mal connues ;

- il faut mettre en place et/ou coordonner la surveillance sanitaire liée à ces zones à risques (contamination des poissons, des légumes...) ;
 - il faut poursuivre l'effort d'information du public et des industriels, et d'aide destiné à maximiser les taux de recyclage des métaux et à minimiser les taux de fuite vers le milieu aquatique, les usages ayant déjà été réduits d'un facteur supérieur à dix depuis trente ans ;
 - il faut mieux comprendre la permanence de ce taux de fuite élevé en mercure, alors que son usage a très fortement chuté : les points bas des réseaux d'eau usée, les hôpitaux, les chantiers de démolition pourraient être des sources rémanentes ;
 - des mesures de remédiation* expérimentale de sites pollués pourraient être tentées en prenant en compte les travaux réalisés sur les anciens sites industriels du nord de la France ou d'autres pays (Pays Bas, USA).
- Une meilleure coordination entre les services concernés par le problème des métaux est également nécessaire : en plus des résultats acquis par le PIREN-Seine, nous avons utilisé ici des données produites par près d'une dizaine de ministères et d'administrations, souvent indépendamment les unes des autres, à des pas de temps différents et/ou sur des territoires variés, sans prendre en compte leur utilisation pour la gestion de l'environnement. Il est essentiel que les progrès importants acquis depuis trente ans sur la Seine puissent être poursuivis.

Tableau 6 : Bilan des principales connaissances sur la contamination métallique et l'arsenic dans le bassin de la Seine.

Métal, usages, sources, contaminations et impacts	Le passé (1935-1980)	Le présent (1994-2004)	L'avenir
Arsenic (As)			
Usages et sources	Insecticides Mort aux rats Décoloration du verre Pigments verts Pyrotechnie Produits pharmaceutiques Alliages du Pb	Décoloration du verre Synthèse de produits pharmaceutiques Pyrotechnie	
Contamination et impacts	Contamination limitée en diminution depuis 1945	Concentration très proche des niveaux naturels	Surveillance épisodique
Cadmium (Cd)			
Usages et sources	Usages croissants jusqu'en 1995 Pigments jaunes Traitement de surface (galvanoplastie) Accumulateurs Ni/Cd Stabilisation du polychlorure de vinyle Rejets directs dans l'estuaire (phospho-gypses : 1985-1995) Rejets associés aux usages du Zn	Usages décroissants depuis 1995 Obligation de récupération des piles et accumulateurs Ni/Cd Apports agricoles par les engrais phosphatés Mise en décharge d'ordures ménagères et de sables de réseau	Gestion difficile des contaminations héritées : <ul style="list-style-type: none"> • sédiments alluviaux à l'aval de Paris • matériaux de dragage des voies naviguées • certains sites historiques d'épandage des eaux ou des boues urbaines
Contamination et impacts	Facteur d'enrichissement (EF*) extrême dans les sédiments (50 à 100 selon les sites) Contamination décroissante depuis 1975 Impacts non quantifiés sur le milieu aquatique	Origines industrielles multiples Épuration limitée par les stations d'épuration Redissolution dans l'estuaire du Cd fixé sur les sédiments Facteur d'enrichissement (EF) encore élevé (12 à Poses en 1994-96)	Contamination à l'aval de Paris encore très élevée par rapport au bruit de fond* géochimique Surveillance accrue, en particulier des concentrations dissoutes* Diagnostic de la contamination des organismes aquatiques

CONCLUSION

Métal, usages, sources, contaminations et impacts	Le passé (1935-1980)	Le présent (1994-2004)	L'avenir
Cuivre (Cu) et Chrome (Cr)			
Usages et sources	Cu : Chaudières à vapeur, tubes, laiton et bronze Cr : Agent tannant depuis le XIX ^e siècle, traitement de surface	Cu : Réseau d'eau potable Cr : Agent tannant et traitement de surface	
Contamination et impacts	Forte contamination de 1940 à 1970, en décroissance depuis 1970	Facteur d'enrichissement (EF*) encore élevé (Cu : 12 à Poses de 1994 à 1996)	Surveillance modérée
Mercure (Hg)			
Usages et sources	Très forte diminution des usages depuis 1960 (facteur 100) Usages principaux : électrodes de mercure pour la production de chlore et de soude (vallée de l'Oise), fabrication de tubes fluorescents, fongicides (organo-mercuriels), baromètres et thermomètres, piles, amalgames dentaires, réactifs d'analyse	Origines multiples difficilement quantifiables Réactifs d'analyse de l'eau (demande chimique en oxygène) Mise en décharge d'ordures et de sables de réseau Interdiction des thermomètres à Hg (1999) Diminution d'usages industriels sur le bassin de la Seine : production de chlore et de soude, piles	Traitement des déchets et mise en décharge Incinérateurs d'ordures Amalgames dentaires Crémation
Contamination et impacts	Facteur d'enrichissement (EF) extrême dans les sédiments (supérieurs à 100) Impacts non quantifiés sur le milieu aquatique et estuarien (méthyl mercure)	Facteur d'enrichissement (EF) le plus élevé des métaux (18 à Poses de 1994 à 1996)	Décroissance très lente des teneurs malgré la chute des usages : vers une décontamination à très long terme Gestion des sédiments contaminés à suivre, en particulier en milieu faiblement oxygéné Surveillance accrue, en particulier des concentrations dissoutes* Diagnostic de la contamination des organismes aquatiques
Nickel (Ni)			
Usages et sources	Usage industriel : traitement de surface		
Contamination et impacts	Contamination très limitée des sédiments, par comparaison aux autres métaux	80% dissous dans les rejets de stations d'épuration Teneur dans les particules voisine de celle du bruit de fond naturel	Surveillance modérée

Métal, usages, sources, contaminations et impacts	Le passé (1935-1980)	Le présent (1994-2004)	L'avenir
Plomb (Pb)			
Usages et sources	Tuyaux Joints d'étanchéité des toitures Protection des câbles enterrés ou sous-marins Accumulateurs Verres au Pb Plomb de chasse Pigments blancs (céruse) et jaunes (chromate de plomb) Plomb tétraéthyle limité par palier puis interdit (1975 à 2000)	Recyclage important des accumulateurs Joints d'étanchéité des toitures Disparition des usines d'acide sulfurique (1962) Remplacement des écrans cathodiques par des écrans plats (2000) Retombées atmosphériques Remplacement progressif des réseaux d'eau potable Interdiction progressive des plombs de chasse (2006 pour les usages en zones humides)	Identification et gestion des sites historiques (1800-1980) d'utilisation et de stockage du plomb : friches industrielles, décharges Permanence du plomb utilisé dans les bâtiments
Contamination et impacts	Très forte contamination en décroissance depuis 1960 (facteur 20)	Diminution des teneurs dans les sédiments de crue depuis 1960 Facteur d'enrichissement (EF*) élevé à l'aval de Paris (12 à Poses de 1994 à 1996)	Cartographie des sols agricoles contaminés (voie atmosphérique, plaine alluviale, boues urbaines) Surveillance modérée Diagnostic de la contamination des organismes aquatiques Surveillance de la concentration dissoute
Zinc (Zn)			
Usages et sources	Zinc laminé pour les toits de Paris <i>intra muros</i> , depuis Haussmann, gouttières et évacuation des eaux pluviales Alliages : laiton et zamak (automobile, quincaillerie et électroménager) Traitement de surface : galvanisation Pigments blancs (ZnO)	Toitures de Paris <i>intra muros</i> Galvanoplastie Alliages Retombées atmosphériques Mise en décharge d'ordures ménagères Sources industrielles difficiles à quantifier	
Contamination et impacts	Très forte contamination en décroissance depuis 1960 (supérieure à 20)	Proportion significative du flux à Poses d'origine inconnue (40%) Facteur d'enrichissement (EF) élevé (10 à Poses de 1994 à 1996)	Cartographie des sols agricoles contaminés (voie atmosphérique, plaine alluviale, boues urbaines) Surveillance modérée Diagnostic de la contamination des organismes aquatiques Surveillance de la concentration dissoute