



Les métaux dans le bassin de la Seine - Comprendre d'où proviennent et comment circulent les métaux dans un bassin versant fortement exposé aux pressions humaines

Daniel R. Thevenot, Laurence Lestel, Marie-Hélène Tusseau-Vuillemin,
Jean-Louis Gonzales, Michel Meybeck

► To cite this version:

Laurence Lestel, Marie-Hélène Tusseau-Vuillemin, Jean-Louis Gonzales, Michel Meybeck (Dir.). Les métaux dans le bassin de la Seine - Comprendre d'où proviennent et comment circulent les métaux dans un bassin versant fortement exposé aux pressions humaines. Daniel R. Thévenot. Agence de l'Eau Seine-Normandie, 7, pp.60, 2009, Collection du programme PIREN-Seine, Jean-Marie Mouchel; Gilles Billen, 978-2-918251-06-4. hal-01087744

HAL Id: hal-01087744

<https://enpc.hal.science/hal-01087744v1>

Submitted on 26 Nov 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



eau
seine
NORMANDIE

PROGRAMME PIREN-SEINE

Programme Interdisciplinaire de Recherche
sur l'Environnement de la Seine



Les métaux dans le bassin de la Seine

Comprendre d'où
proviennent et comment
circulent les métaux dans
un bassin versant
fortement exposé aux
pressions humaines

Sous la direction de Daniel R. Thévenot

ENSEMBLE
DONNONS
vie à l'eau

Agence de l'eau

#7

L'Agence de l'eau Seine-Normandie a pour mission, conjointement avec les acteurs de l'eau, de conduire les eaux du bassin de la Seine vers le bon état écologique.

Depuis 1989, le Programme de Recherche Interdisciplinaire sur l'Environnement de la Seine (PIREN-Seine) nous aide à mieux comprendre le fonctionnement du bassin et contribue aux décisions de l'Agence.

Ce programme de recherche a apporté un éclairage décisif sur la manière dont les rivières et les zones humides participent à l'épuration de nos effluents, sur la nécessité de réduire nos rejets en phosphore pour limiter l'eutrophisation, sur l'impact attendu du changement de pratiques culturelles afin de réduire la contamination des eaux par les nitrates, etc.

Partenaire du PIREN-Seine, l'Agence de l'eau souhaite valoriser l'important travail accompli et soutenir les recherches futures en contribuant à la publication de ces travaux.

C'est l'objet de cette collection que de faire partager au plus grand nombre ces connaissances longuement mûries.

Guy Fradin

Directeur de l'Agence de l'eau Seine-Normandie

Le programme de recherche PIREN-Seine est né en 1989 de la volonté du CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) de faire se rencontrer les chercheurs de diverses disciplines (une centaine de personnes appartenant à une vingtaine d'équipes) et les acteurs qui ont en charge la gestion des ressources en eau (une dizaine d'organismes publics et privés) dans cet espace de 75 000 km² constituant le bassin hydrographique de la Seine. En s'inscrivant dans la durée, tout en redéfinissant périodiquement ses objectifs et ses orientations, le programme, basé sur la confiance et le dialogue, a permis l'émergence d'une culture scientifique partagée entre gestionnaires et scientifiques. Les recherches à caractère appliqué sont menées dans un cadre coordonné privilégiant le développement de notre capacité à analyser, à comprendre et à prévoir le fonctionnement de cet ensemble régional d'écosystèmes qu'est le bassin de la Seine : comment ce territoire, avec sa géologie, son climat, sa végétation, mais aussi avec ses activités agricoles, domestiques et industrielles, fabrique-t-il à la fois le milieu aquatique lui-même et la qualité de l'eau de nos rivières et de nos nappes ?

Par un pilotage souple et participatif, le programme a su concilier, au sein d'une même démarche, les exigences d'une recherche fondamentale qui vise à fournir les clés pour comprendre, avec celles de la demande sociale qui attend des outils pour guider l'action.

Mais la demande sociale ne s'exprime pas seulement par le questionnement technique des gestionnaires. Elle passe aussi par le débat public avec les élus, les associations, les citoyens. L'état présent du milieu aquatique résulte de l'action millénaire de l'homme sur son environnement. Sa qualité future dépendra de ce que nous en ferons ; ce qui appelle un débat sur la manière dont nous voulons vivre sur le territoire qui produit l'eau que nous buvons, compte tenu des contraintes que nous imposent la nature et la société. L'ambition du PIREN-Seine, en tant que programme de recherche publique engagé, est aussi d'éclairer un tel débat. C'est dans cet esprit que nous avons entrepris la publication de cette collection de travaux. Elle veut offrir aux lecteurs, sur les sujets porteurs d'enjeux en matière de gestion de l'eau, les clés de la compréhension du fonctionnement de notre environnement.

Jean-Marie Mouchel et Gilles Billen

Direction du Programme PIREN-Seine



La collection du programme PIREN-SEINE

Cette collection analyse différents aspects du **fonctionnement du bassin de la Seine** et de ses grands affluents, soit 75 % du territoire d'intervention de l'Agence de l'eau Seine-Normandie. D'autres programmes, en liaison avec le PIREN-Seine, s'intéressent à des régions ou des problématiques différentes. Ainsi Seine-Aval se focalise sur l'estuaire de la Seine et édite une collection similaire depuis 1999.



#1 - Le bassin de la Seine



#2 - L'hydrogéologie



#3 - La pollution par les nitrates



#4 - Le peuplement de poissons



#5 - L'agriculture



#6 - L'eutrophisation des cours d'eau



#7 - Les métaux



#8 - La contamination microbienne



#9 - La micro pollution organique

D'autres fascicules sont à paraître dans les domaines suivants : les zones humides, les pesticides, l'histoire de Paris, les petites rivières urbaines et les risques écotoxicologiques.

La couleur de chaque fascicule renvoie à l'un des quatre objectifs principaux de l'Agence de l'eau :

- Développer la gouvernance, informer et sensibiliser sur la thématique de l'eau
- Satisfaire les besoins en eau, protéger les captages et notre santé
- Reconquérir les milieux aquatiques et humides, favoriser la vie de la faune et de la flore
- Dépolluer, lutter contre les pollutions de l'eau et des milieux aquatiques

Les Métaux

dans le bassin de la Seine

Auteurs :

Daniel R. THÉVENOT ⁽¹⁾, Laurence LESTEL ⁽²⁾, Marie-Hélène TUSSEAU-VUILLEMIN ⁽³⁾,
Jean-Louis GONZALEZ ⁽⁴⁾ & Michel MEYBECK ⁽⁵⁾

[1] Université Paris-Est, Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes urbains (LEESU, antérieurement CEREVE), UMR-MA 102, Faculté de Sciences et Technologie, 61 Avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex,

[2] Conservatoire national des Arts et Métiers, Centre d'Histoire des Techniques et de l'Environnement, 5 rue du Vertbois, 75003 Paris,

[3] CEMAGREF, HBAN, Parc de Tourvoie, B.P. n° 44, 92163 Antony Cedex,

[4] IFREMER, Département Biogéochimie et Ecotoxicologie, B.P. 330, Zone Portuaire de Brégaillon, 83 507 La Seyne/mer Cedex,

[5] Université P. et M. Curie, UMR Sisyphe 7619, boîte 105, 4 place Jussieu, 75006 Paris.



RÉSUMÉ

Si les habitants du bassin de la Seine utilisent des métaux depuis des siècles, leur usage intensif (zinc, plomb, cuivre, cadmium, mercure, arsenic, nickel notamment) remonte aux XVIII^e et XIX^e siècles, lors de la révolution industrielle et du développement de l'agglomération parisienne.

Les premières analyses quantitatives de métaux dans l'eau n'ont cependant été réalisées que dans les années 1970, faute de méthode suffisamment sensible. Depuis 1983, la surveillance systématique du bassin et de l'estuaire a été mise en place et cherche à répondre aux exigences de la loi française et européenne.

Ce fascicule présente le travail de recherche sur les métaux conduit par le Programme multidisciplinaire de recherche sur la Seine et son bassin, dit PIREN-Seine, initié par le CNRS et la Délégation de Bassin en 1989. Il reprend également les données scientifiques recueillies par une dizaine d'organismes ou d'administrations spécialisés. Grâce à l'utilisation de sédiments déposés sur les berges de la Seine, l'évolution de la contamination métallique du bassin a pu être estimée depuis 1935.

On trouvera dans ce fascicule une description méthodique de l'évolution des usages des métaux suivant les époques ainsi qu'une présentation du dispositif de surveillance du bassin et des méthodes employées suivant la nature des échantillons et la forme des métaux recherchés.

Un bilan des flux annuels de métaux sur le bassin de la Seine a permis d'identifier, élément par élément, les sources principales de rejets, tant sur les sols que vers les cours d'eau. L'estimation de l'évolution de ces flux métalliques depuis cinquante ans montre que le pic de pollution a probablement été atteint entre 1960 et 1970. La société n'était alors consciente ni de son importance, ni de sa nocivité, et ne cherchait guère à l'enrayer.

Depuis, le contexte réglementaire est devenu très contraignant.

La Seine, fleuve au débit lent, traversant des sols faiblement érodés et accueillant la forte population de la région parisienne, est structurellement vulnérable à la pollution métallique qu'elle élimine difficilement. Les auteurs suggèrent de nouvelles mesures de surveillance, d'information ou de protection qu'il conviendrait d'adopter.

En effet, la directive cadre européenne sur l'eau nous fait obligation de restaurer le « bon état des milieux aquatiques ». Reste à évaluer ce qu'il est possible de faire, techniquement et en matière de coût économique et social.

SOMMAIRE

7 Introduction

9 NOMS ET SYMBOLES DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS MÉTALLIQUES

EXPLIQUER

10 La présence de métaux dans le système fluvial

11  Les métaux et l'homme, une longue histoire

13  La Seine, un bassin très peuplé

14  Circulation et surveillance des métaux dans le bassin

16  DANGEROSITÉ DES MÉTAUX ET VOIES DE CONTAMINATION MÉTALLIQUE D'UN SYSTÈME FLUVIAL

DÉCRIRE

18 La contamination par les métaux particuliers

20  Distribution spatiale de la contamination métallique, des ruisseaux à l'embouchure

21  Sur quels supports analyser les métaux ?

22  Impact induit par l'agglomération parisienne sur le cycle saisonnier de la contamination fluviale

CONNAÎTRE

24 La fraction biodisponible* des métaux en vue d'évaluer leur impact écotoxicologique

25  LES MÉTAUX ET LA DIRECTIVE CADRE EUROPÉENNE SUR L'EAU (DCE*)

26  DGT* et biotests : des approches efficaces mais délicates

27  Au plus près de la biodisponibilité en utilisant le gradient de diffusion en couche mince (dgt)

28  Évolution amont-aval des concentrations en métaux dissous* et labiles*

29  L'épuration des métaux dans les eaux urbaines

30  ÉPURATION DES EAUX USÉES DOMESTIQUES : UN MASTODONTE, LA STATION D'ÉPURATION DE SEINE-AVAL (STEP S-A) À ACHÈRES

31  Le pic du cadmium dissous dans l'estuaire de la Seine : un phénomène explicable

33  Norme de qualité environnementale

DRESSER

34 Un bilan des métaux

35  Comparaison des principaux flux actuels à l'échelle du bassin

38  Imprécision des bilans : retombées atmosphériques et flux métalliques de la Seine à Poses

ANALYSER

40 L'évolution à long terme de la contamination

41  Évolution des sources de contamination

42  La contamination du milieu aquatique archivée dans les sédiments

45  Une décontamination régulière depuis 1979

46  Pollution de la Seine par rapport aux autres fleuves

ANALYSER

48 Les réponses de la société à la pollution métallique

51 Conclusion

51  Des pressions élevées sur un milieu sensible

52  Le problème majeur : gérer l'héritage

INTRODUCTION

L'usage des métaux a sans doute conduit à l'un des tous premiers impacts de l'homme sur le milieu aquatique : des contaminations extrêmes de sédiments, datant des activités minières de l'Âge du Bronze, il y a 2500 ans, ont été mises en évidence dans le Rio Tinto du sud de l'Espagne. Bien que le bassin de la Seine ne possède plus de mines, il est exposé depuis longtemps à des pressions industrielles et urbaines importantes, particulièrement en raison du développement de l'agglomération parisienne qui atteint aujourd'hui près de dix millions d'habitants.

Les métaux et l'arsenic ont été reconnus depuis l'Antiquité pour leurs effets marqués sur les organismes vivants, parfois utilisés comme médicaments, parfois comme poison. C'est au XIX^e siècle que les effets toxiques en milieu industriel, de certains d'entre eux comme le plomb (saturnisme*) et le mercure (hydrargyrisme) ont été décrits avec précision. Dans les années 1960, les maladies liées à une exposition environnementale au mercure (Minamata) et au cadmium (Itai-Itai) au Japon sont responsables de dizaines de morts et de centaines de victimes. Elles produisent un choc mondial dans l'opinion.

La Seine (65 000 km² de bassin jusqu'à l'entrée de l'estuaire, 540 m³/s de débit moyen à Poses) n'est pas le fleuve français le plus puissant ni en matière de débit, ni en ce qui concerne les sédiments arrachés par l'érosion naturelle. Le rapport entre les pressions humaines et la capacité de dilution du milieu est donc ici faible, ce qui donne lieu à des concentrations qui ont pu être très élevées (ou le sont toujours) en cadmium, cuivre, chrome, mercure, plomb, nickel et zinc ainsi qu'en arsenic (Voir Notions clés : noms et symboles des principaux éléments métalliques, page 9).

Cette contamination très forte est sans doute ancienne car certains usages massifs des métaux sont connus depuis plus de deux siècles.

Mais elle est restée inconnue jusqu'au début des années 1970, pour plusieurs raisons :

- avant 1970, les techniques d'analyse chimique étaient très compliquées et onéreuses, avec des limites de détection qui demeuraient élevées ;
- sur la Seine, comme partout dans le monde, la contamination métallique ne faisait pas partie des objectifs de surveillance de la qualité de l'eau, ni des milieux aquatiques ;
- les premières études pilotes effectuées dans les années 1970 n'ont pas diagnostiqué le caractère extrême de la contamination par manque de référence, tant sur les niveaux naturels du bassin, que sur les autres fleuves français et européens ;
- la surveillance régulière des métaux dans le bassin ne s'est développée que progressivement, depuis 1983.

Dès sa création en 1989, le programme multidisciplinaire de recherche sur la Seine et son bassin, initié par le CNRS et la Délégation de Bassin, devenue Délégation régionale de l'environnement Île-de-France (DIREN IdF), le PIREN-Seine, s'est focalisé sur les métaux, croisant les approches multiples : bilan de matières en milieu rural, urbain et sur l'ensemble du bassin, évolution historique des pressions, reconstitution de l'histoire de la contamination dans les sédiments alluviaux, distribution et réactivité des différentes formes physico-chimiques.

Toutes ces études concernent l'amont de Poses (figure 2, page 13), car l'estuaire a été spécifiquement étudié par le programme de recherche Seine-Aval, fondé en 1995, qui a considéré le devenir des métaux apportés par la Seine ou rejetés directement dans l'estuaire (<http://seine-aval.crihan.fr/>). Dans cet estuaire, seul l'exemple du cadmium est présenté ici.

Le principal résultat de ces recherches est paradoxal: en dépit d'une augmentation croissante des usages du cuivre, plomb, chrome ou zinc (de 1950 à 2000) et du cadmium (jusqu'en 1995 seulement), on observe une décroissance marquée des niveaux de contamination depuis 1950-1960, d'un facteur dix et parfois plus, initiée une quinzaine d'années avant le début des mesures environnementales. La trajectoire du mercure est à part, car ses niveaux restent élevés malgré des usages en chute depuis 1960. La gestion à long terme des pics de contamination hérités des années 1950-1980 de certains sols ou de sédiments anciens contaminés, qui peuvent aujourd'hui être qualifiés de « déchets toxiques » par la nouvelle réglementation, demeure une question ouverte.

Les interactions complexes entre la société et le bassin fluvial, en ce qui concerne les métaux, et la grande diversité des niveaux de contamination dans l'espace, depuis les têtes de bassin jusqu'à l'estuaire, ou dans le temps depuis 1935, sont présentées ici en 7 sections :

- usages des métaux et voies de contamination dans les bassins fluviaux ;
- distribution de la contamination dans le bassin de la Seine ;
- réactivité et biodisponibilité des métaux ;
- bilan de masse des transferts annuels de métaux dans les différents compartiments du système fluvial (apports atmosphériques, parcelles agricoles, petit bassin versant urbain, ensemble du bassin) ;
- évolution à long terme (1935-2000) de la contamination à l'aval de Paris ;
- réponses apportées par la société ;
- conclusion.

En raison de la grande affinité de nombreux métaux pour la matière particulaire (sols, particules en suspension, sédiments déposés), de la difficulté et du coût des analyses de métaux dissous qui exigent des limites de détection très basses, la majeure partie de ces études n'a pu être réalisée que sur la phase solide.

Le lecteur pourra trouver des compléments d'information dans les synthèses du PIREN-Seine (Thévenot et al., 1998 ; Thévenot et al., 2003 ; <http://www.piren-seine.fr/>), ainsi que dans les publications scientifiques listées en fin de document (page 56).



Une décharge métallique : une source encore méconnue de rejets dans les milieux aquatiques.

Noms et symboles des principaux éléments métalliques

Les noms de métaux sont accompagnés de leur numéro et masse atomique, ainsi que de leur température de fusion (°C).

Les symboles alchimiques sont réalisés d'après Olivier Lafont, d'Aristote à Lavoisier, Ellipses, 1994.

Élément	Symbole	Numéro atomique	Masse atomique	Température de fusion	Symbole alchimique	Planète
Aluminium	Al	13	27	660		
Argent	Ag	47	108	961		Lune
Arsenic*	As	33	75	817		
Cadmium	Cd	48	112	321		
Cuivre	Cu	29	63,5	1083		Vénus
Chrome	Cr	24	60	1857		
Cobalt	Co	27	59	1485		
Etain	Sn	50	119	232		Jupiter
Fer	Fe	26	56	1535		Mars
Manganèse	Mn	25	55	1245		
Magnesium	Mg	12	24	650		
Mercure	Hg	80	201	-39		Mercure
Nickel	Ni	28	59	1453		
Or	Au	79	197	1069		Soleil
Plomb	Pb	82	207	327		Saturne
Potassium	K	19	39	64		
Sélénium*	Se	34	79	217		
Sodium	Na	11	23	98		
Vanadium	V	23	51	1890		

(*) L'arsenic et le sélénium ne sont pas des métaux mais des métalloïdes. Toutefois, du fait de leur toxicité, ils sont fréquemment considérés avec les métaux (voir Notions clés : Dangerosité des métaux, pages 16 et 17).



La présence de métaux dans le système fluvial

La longue histoire des interactions entre l'Homme et les métaux remonte à l'Antiquité. Néanmoins, elle a connu un développement considérable lors de la révolution industrielle et du développement de l'agglomération parisienne. Si l'on prend en compte la dangerosité des métaux, il est donc nécessaire de bien comprendre leurs voies de circulation dans le bassin et de mettre en place des stratégies de surveillance adaptées.



Les métaux et l'homme, une longue histoire

Les habitants du bassin de la Seine utilisent, depuis des siècles, de grandes quantités de métaux pour leur usage personnel comme pour celui de leurs ateliers et usines. Comme le bassin n'a plus du tout d'activité minière, la totalité des sources de métaux vient de l'extérieur du bassin et une grande partie est exportée sous forme de produits finis. Cependant les nuisances et les pollutions générées par ces activités industrielles se sont accumulées depuis des siècles.

De très nombreux usages expliquent la présence de métaux dans le bassin de la Seine. La révolution industrielle se traduit par l'usage de machines grandes consommatrices de métaux non ferreux [figure 1.A et B, page 11]. Les nouvelles chaudières à vapeur sont en cuivre, le plomb sert à la construction de « chambres » où est fabriqué, pour la première fois à l'échelle industrielle, l'acide sulfurique qui est considéré comme le « baromètre de l'activité industrielle » dès le début du XIX^e siècle [figure 1.C, page 12]. Puis ces métaux se répandent dans la ville :

- le zinc couvre les toits de Paris (voir photo de couverture) ;
- les maisons s'équipent en réseaux de distribution d'eau et de gaz, grâce aux canalisations en plomb.

Certains de ces usages sont loin d'être anodins :

- l'Empire, avec son amour des ors, conduit à la dissipation de grandes quantités de mercure pour la dorure des boutons et horloges [figure 1.D, page 12] ;



Figure 1 : Activité industrielle en région parisienne aux XIX^e et XX^e siècles :

A. les dix-huit cheminées de Saint-Denis par Paul Signac (1933).

- la ville blanchit ses murs, extérieurs et intérieurs, grâce à des pigments à base de carbonate de plomb - la céruse - toxique [figure 1.E, page 12] ;
- la beauté des verts d'arsenic conduit à leur utilisation dans les teintures, les papiers peints, les fleurs artificielles ;
- le jaune de cadmium ou « Jaune brillant » entre dans la palette des peintres, dans les encres d'imprimerie puis dans la coloration des matières plastiques ;
- depuis la fin du XIX^e siècle, le chrome sert d'agent tannant ;
- le cuivre est particulièrement utilisé dans l'ancien département de la Seine (Paris et la petite couronne) pour la fabrication de tubes et chaudières. Il est également présent sous forme de laiton ou de bronze ;
- plus tard viendront les accumulateurs (en plomb), les piles (à oxyde de mercure, Ni/Cd,...), autant d'objets à courte durée de vie et dont le destin fut longtemps d'être rejetés dans l'environnement.

La rareté et le prix des métaux au XIX^e siècle conduisaient à des stratégies de récupération, que la société consommatrice du XX^e siècle a oubliées.



B. Ivry vers 1900 par Léon Lindet
(don de Marie-Pierre Arnaud-Lindet).



C. La production d'acide sulfurique à l'usine de Saint-Gobain d'Aubervilliers (carte postale, XX^e siècle, Musée d'Art et d'Histoire de Saint-Denis).



D. Horloge Empire, dorée au mercure.



E. Illustration du poème « L'empoisonné » de L. Hugues (1929).

Déjà au XIX^e siècle, l'usage de ces métaux n'était pas sans risque grave pour certaines catégories sociales comme les ouvriers. L'usine de Clichy de fabrication de la céruse emploie une cinquantaine d'ouvriers. Elle envoie cependant chaque année plus de 200 malades atteints de coliques saturniques* à l'hôpital. Les peintres en bâtiment qui utilisent majoritairement ce pigment blanc sont également atteints (figure 1.E, page 12).

Des 15 000 ouvriers qui fabriquent des fleurs artificielles à Paris en 1859, on estime qu'un quart était en contact avec le vert de Schweinfurth, un dérivé de l'arsenic.

Les doreurs sur métaux (figure 1.D, page 12) et les chapeliers feutrants des peaux de lapin sont atteints de tremblements mercuriels comme le chapelier fou d'Alice au Pays des Merveilles.

Au XX^e siècle, on évoquera moins ces maladies professionnelles que le risque pour l'ensemble de la population entourée de ces produits rejetés dans l'atmosphère (le plomb tétraéthyle de l'essence jusqu'à son interdiction en 2000), dans les eaux (le mercure des plombs dentaires, les métaux entraînés par ruissellement) ou dans les décharges (piles Ni/Cd, métaux non recyclés...). Depuis les années 1950, les industries ont été contraintes de réduire leurs émissions.

Les métaux couramment utilisés par l'homme tels que le cadmium, le cuivre, le chrome, le mercure, le nickel, le plomb et zinc sont à l'origine de nombreuses maladies environnementales graves comme la maladie de Minamata – due au mercure – ou le saturnisme* – dû au plomb.

L'impact sur la santé humaine de leur présence cumulée reste cependant mal connu, même si leur concentration maximale dans les eaux de consommation humaine est sévèrement contrôlée (Notions clés : **Dangerosité des métaux et voies de contamination métallique d'un système fluvial** pages 16 et 17).

La tentation est grande de reconstruire ainsi une histoire globale de la circulation des métaux depuis le début du XIX^e siècle, mais l'envie se heurte à la disponibilité des sources historiques, à leur temporalité.

Même si les statistiques sont abondantes depuis le début du XIX^e siècle, elles ne sont pas suffisantes pour reconstruire l'ensemble du cycle des métaux depuis leur production, leurs usages et leur devenir environnemental. Nous limiterons donc notre propos à l'après seconde guerre mondiale.

La Seine, un bassin très peuplé

Le bassin de la Seine, 65 000 km² jusqu'à l'entrée de la Seine à Poses [figure 2], est caractérisé par une très forte densité de population, soit 215 habitants /km² en moyenne, essentiellement concentrée sur l'agglomération parisienne. Méga Paris*, à lui seul, compte 9,47 millions d'habitants rassemblés sur 2 740 km².

Le bassin de la Seine contribue actuellement à 25% de la production agricole française, 25 à 30% de sa production industrielle et 23% de sa population,

alors que sa contribution aux flux hydrologiques et sédimentaires annuels est inférieure à 10%.

Près de 80% en 1994-2003 [période de référence des bilans à l'échelle du bassin, figure 14, page 36] ou de 70% en 2007 des eaux usées produites par Méga Paris sont collectées et traitées dans la station d'épuration Seine-Aval, la plus grande d'Europe, qui rejette ses eaux usées traitées à quelques kilomètres en amont de la confluence entre la Seine et l'Oise.

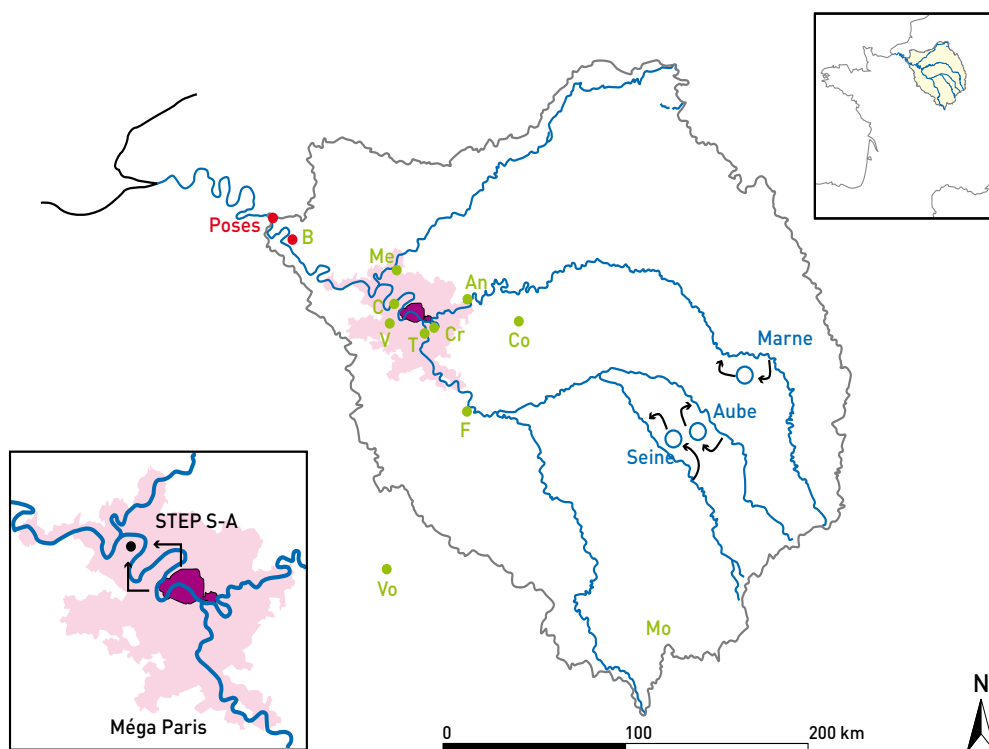


Figure 2 : Bassin de la Seine, à l'amont de l'estuaire à Poses, Méga Paris (en rose), station d'épuration de Seine-Aval (STEP S-A) et Paris intra muros (en violet).

En amont, sur les cours de la Seine, de l'Aube et de la Marne, emplacement des 3 barrages - réservoirs.

Points de collecte et d'analyse des échantillons* par les chercheurs du PIREN-Seine de 1990 à 2005 (en vert) :

- des sédiments, dans les plaines d'inondation à Bouafles (B), à l'amont de Poses, ainsi que dans les 3 barrages - réservoirs et dans plus d'une centaine de stations situées sur l'ensemble des rivières, des têtes de bassin jusqu'à l'embouchure ;

- des retombées atmosphériques à Chatou (C), Versailles (V), Paris centre, Créteil (Cr), Thiais (T), Coulommiers (Co), forêt de Fontainebleau (F), parc régional du Morvan (Mo) et dans la forêt de Vouzon (Vo) en Sologne ;

- des mousses terrestres provenant d'une centaine de sites répartis sur tout le bassin ;

- des matières en suspension collectées à l'aide de trappes, placées en amont et aval de Méga Paris à Annet sur la Marne (An), ainsi qu'à Méry sur l'Oise (Me) et à Poses.

Circulation et surveillance des métaux dans le bassin

Les débits spécifiques de la Seine sont très modérés (6,4 l/s/km² contre 17,8 l/s/km² pour le Rhône) et atteignent 40 m³/s à l'étiage dans Paris.

Afin de maintenir un débit d'étiage estival de la Seine à Paris supérieur à 100 m³/s pour diluer les effluents de ses stations d'épuration et assurer, en toutes saisons, l'alimentation en eau potable de la capitale, trois grands réservoirs ont été construits sur le cours amont de la Seine (1966), de la Marne (1974) et de l'Aube (1990) [figure 2, page 13].

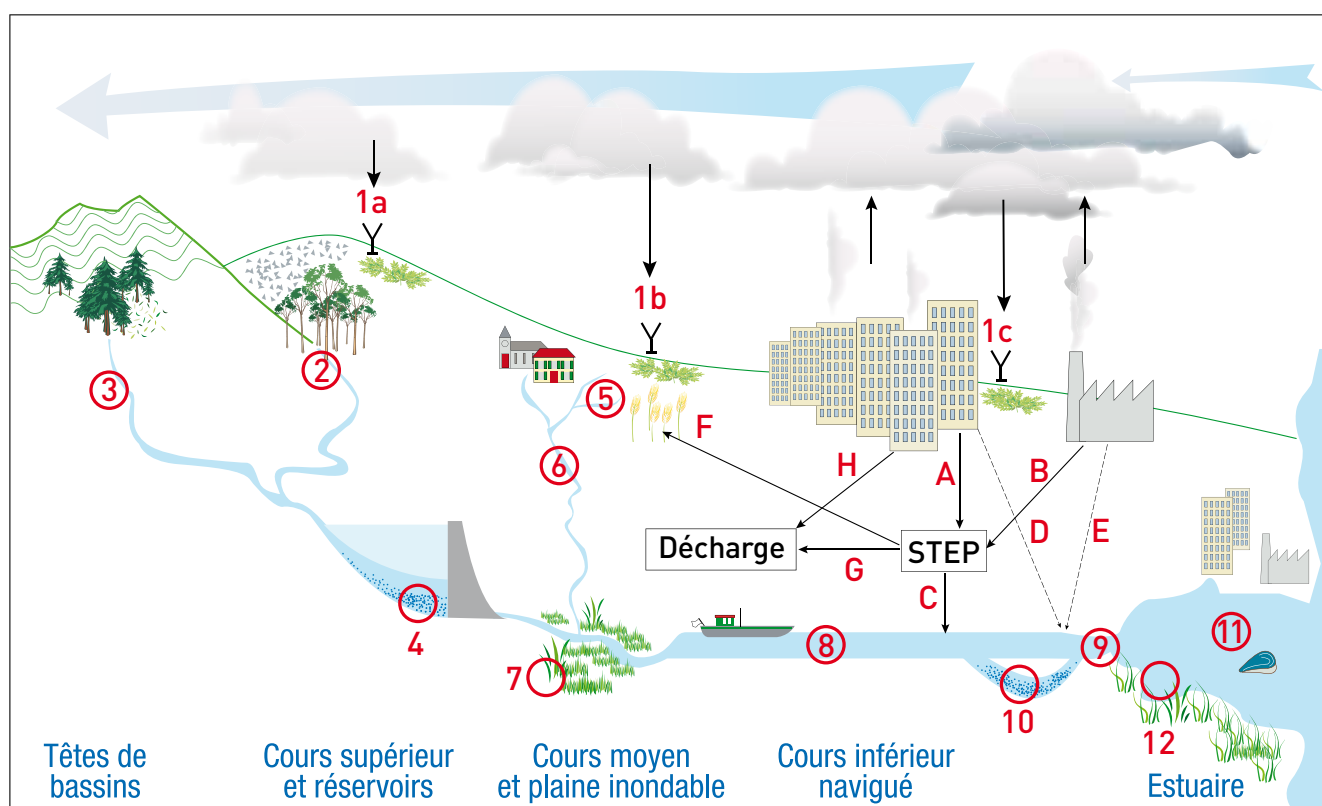


Figure 3 : Surveillance de la contamination métallique dans le bassin versant de la Seine.

Collecte des retombées (dépôts) atmosphériques sur les têtes de bassin (1a), le milieu rural (1b) et urbain (1c), des matières en suspension dans les ruisseaux forestiers sans village ni agriculture (2 et 3), des sédiments stockés dans les réservoirs (4), des matières en suspension des petits ruisseaux drainant des zones cultivées (5) et rurales (6), des sédiments des plaines inondables du cours moyen (7) et du cours aval de la Seine (10), d'eau et de matières en suspension à l'amont (8) et à l'aval (9) des rejets de l'agglomération parisienne, d'organismes aquatiques (11) et de sédiments dans l'estuaire (12).

Les flux métalliques résultant des activités urbaines sont schématisés globalement en : eaux usées domestiques (A), industrielles (B), rejets d'eaux traitées par les stations d'épuration – STEP – (C), rejets directs d'eau de ruissellement pluvial (D) et d'eaux usées industrielles (E), épandage agricole (F) ou mise en décharge des boues produites par les stations d'épuration (G) et des ordures ménagères (H).

La surveillance des sources, des transferts et du stockage des éléments métalliques dans un bassin à forte concentration humaine nécessite la mise en place de stations de prélèvement périodique depuis les têtes de bassin jusqu'à l'estuaire [\(figure 3\)](#).

Sur le bassin de la Seine, les dépôts atmosphériques (secs, humides ou totaux) sont récoltés par des pluviomètres spéciaux dans plusieurs stations représentatives des régions très éloignées des émissions atmosphériques urbaines et industrielles (1a), mais aussi dans des stations du milieu rural (1b) et du milieu urbain (1c). Ces analyses sont interprétées sur la base d'une cartographie de la contamination des mousses terrestres (environ 100 stations analysées en 2003).

Les ruisseaux forestiers sans village ni agriculture (2 et 3, soit environ 50 sites) servent à établir les bruits de fond naturels des sédiments en métaux dans des contextes géologiques différents [\(tableau 2 page 19\)](#).

Les sédiments stockés par les réservoirs (4) (Grands Lacs de Seine et lacs du Morvan) sont ainsi, pour la Seine, représentatifs d'un milieu soumis à de faibles pressions humaines. Ils ont des teneurs en métaux semblables à celles des petits ruisseaux drainant des zones cultivées (5) et rurales (6).

Les sédiments des plaines inondables du cours moyen (7) et du cours aval (10) peuvent être prélevés sous forme de carottes* pour restituer les archives sédimentaires [\(figure 18, page 43\)](#).

Le bilan de l'agglomération parisienne est établi en comparant les flux à l'amont (8) et à l'aval (9) des rejets de celle-ci.

Les stations estuariennes (11) reflètent à la fois les apports du bassin (9) et les apports fluviaux, urbains et industriels arrivant directement à l'estuaire. Les carottes de sédiments estuariens (12) nous renseignent sur l'évolution des apports nets à la mer.

Les rejets et les flux d'origine humaine sont ici réunis schématiquement à l'aval du bassin (flux A à F) : effluents domestiques représentatifs (flux A), industriels (B), urbains avant et après leur traitement en station d'épuration (STEP, flux C), déversoirs d'orages arrivant directement en Seine par temps de pluie (D).

Les rejets industriels directs (E) sont renseignés depuis environ 15 ans tant par les services des établissements classés (ICPE) que par ceux de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie.

Toutefois ces informations ne sont pas accessibles pour chaque métal ainsi mesuré, et les incertitudes sur ces flux sont mal connues. Elles n'ont donc pu, jusqu'à présent, être utilisées dans les travaux du PIREN-Seine.

Enfin, les boues de STEP utilisées en agriculture (F) sont analysées depuis 1979 pour la station d'épuration de Seine-Aval (Yvelines) gérée par le SIAAP [\(STEP S-A, figure 2, page 13\)](#), mais sont encore très peu connues pour les autres stations d'épuration. La mise en décharge des boues de STEP (flux G) reste peu connue à l'échelle du bassin.



Station d'épuration des eaux usées urbaines : site de Seine-Amont à Valenton (Val de Marne).

Dangerosité des métaux et voies de contamination métallique d'un système fluvial

Les métaux sont connus depuis l'Antiquité pour présenter des effets toxiques. Leur toxicité tant pour l'homme que pour les plantes ou animaux dépend à la fois de l'élément considéré et de la forme chimique qu'il présente, sa spéciation*.

Si les scientifiques ont l'habitude de définir un niveau de concentration maximale sans effet (NOEC), les services sanitaires préfèrent parler de concentration maximale admise dans une eau potable distribuée par réseau ou en bouteilles (tableau 1). Il apparaît ainsi que certains éléments, comme le fer, le potassium, le magnésium ou le sodium, ne posent des problèmes qu'à forte concentration (supérieure à plusieurs dizaines de mg/l). D'autres, comme l'aluminium, le cuivre et le zinc sont peu toxiques pour l'homme, leur niveau maximal admissible étant supérieur à plusieurs centaines de µg/l et leur présence étant nécessaire à très faible concentration (oligo-éléments).

Enfin, un dernier ensemble de métaux (mercure, cadmium, argent, sélénium, étain, plomb, chrome, manganèse et nickel), ainsi que l'arsenic, un métalloïde, sont considérés comme très toxiques, leur concentration maximale devant rester inférieure à quelques dizaines de µg/l.

FACTEUR D'ENRICHISSEMENT (EF*) DES ÉLÉMENTS À POSES	Concentration maximale admise pour chaque élément (µg/l) dans l'eau potable											
	1	5	10	50	100	200	1.000	5.000	10.000	12.000	50.000	200.000
50	Hg											
20												
10			Ag				Cu	Zn				
5		Cd		Pb								
2												
1			Se, Sn	Cr, Mn, Ni	As	Al			Fe	K	Mg	Na
	Très toxiques					Peu toxiques			Posant des problèmes à forte concentration			

Tableau 1 : Comparaison des toxicités et des facteurs d'enrichissement (EF*) des métaux et de l'arsenic : normes françaises des concentrations totales (µg/l) pour l'eau potable distribuée (décrets n°2001-1220 du 20 décembre 2001) et rapports des teneurs métalliques des matières en suspension à Poses et des teneurs en milieu non contaminé (valeurs de référence : Tableau 2, page 19).

Tous ces métaux ne sont pas présents aux mêmes niveaux dans le bassin de la Seine : les teneurs des métaux fixés sur les particules sont comparées aux teneurs observées, en tête de bassin, dans des zones non contaminées : on parle alors de facteur d'enrichissement EF.

Le tableau 1 montre que le mercure est le métal qui, à l'entrée de l'estuaire de la Seine (Poses), est le plus accumulé sur les matières en suspension. Dans ce classement, le mercure est suivi par l'argent, le cuivre, le zinc, le cadmium et le plomb.

Le croisement de la toxicité des métaux et de leur enrichissement dans les particules rejetées dans l'estuaire a conduit les équipes du PIREN-Seine à sélectionner les métaux les plus importants à étudier sur le bassin de la Seine.

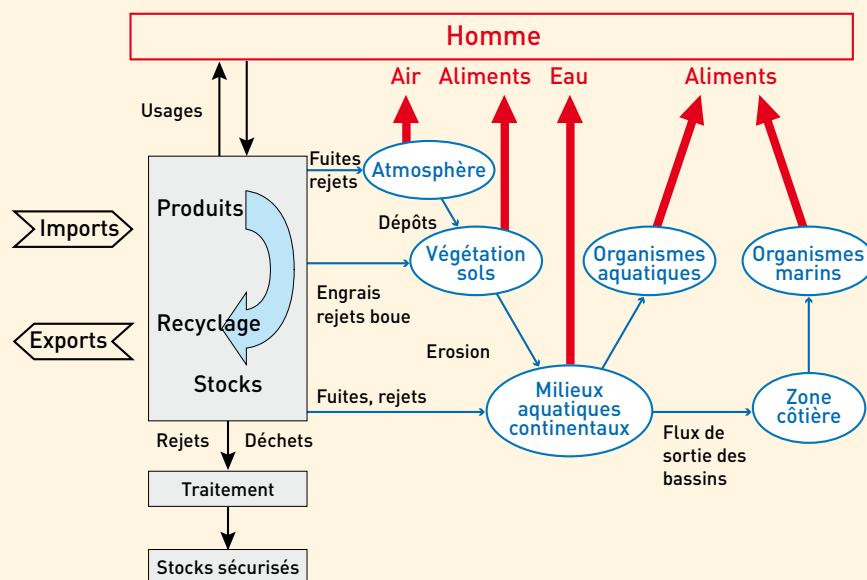


Figure 4 : Les voies de contamination d'un système fluvial sont multiples.

Les activités humaines telles que la combustion du charbon et du pétrole, les transformations des minerais et lingots en métaux, les usages et recyclages de matériaux contenant des métaux (accumulateurs, piles...), les usages directs des métaux dans la construction... génèrent des fuites et des rejets dans l'atmosphère, les sols et le milieu aquatique (figure 4).

Aujourd'hui les rejets industriels liquides sont généralement traités et les déchets solides mis dans des décharges sécurisées.

Les effluents urbains traités dans les stations d'épuration produisent des boues qui sont, pour partie, épandues sur les parcelles agricoles car elles sont riches en matière organique, phosphate et azote. Comme les métaux contenus dans les eaux usées sont épurés par fixation sur des particules qui sont ultérieurement séparées par décantation, les boues produites peuvent donc constituer un apport direct en métaux dans les sols agricoles (figure 14, page 36). Néanmoins, après traitement, une partie non négligeable des métaux reste dans les effluents liquides rejetés en rivière (figure 11, page 29).

Les voies d'exposition de l'Homme aux métaux, dans un bassin versant, sont donc multiples :

- par l'air pour les formes métalliques volatiles (le cadmium, le mercure, anciennement le plomb dans l'essence) ou les poussières (tous métaux) ;
- par l'eau de boisson ;
- par les aliments, dont notamment les organismes aquatiques d'eau douce ou côtiers.

L'importance relative de ces voies d'exposition n'a pu être encore évaluée.



La contamination par les métaux particulaires

Du fait de leur solubilité limitée et de leur grande affinité pour les particules (argile, matière organique), les métaux sont largement présents dans la Seine et ses affluents sous forme particulaire : de 50 à 90% en temps normal et de 90 à 99% en période de crue, selon les métaux.



Alors que les métaux sont principalement fixés aux particules transportées par les rivières ou déposées sur leur lit, l'analyse des métaux dissous, après filtration de l'eau brute, reste coûteuse et délicate, en raison des risques importants de contamination des échantillons* lors de leur manipulation.

Pour ces raisons la contamination métallique a été d'abord établie sur les matières en suspension, sédiments récents ou anciens, mousses terrestres... (figure 6 page 21), puis sur d'autres supports.

Cependant, l'Union Européenne vient de fixer les normes de qualité environnementale sur eau filtrée pour le cadmium, le plomb, le mercure et le nickel (17 juin 2008, voir tableau 3, page 33).

Dans les fleuves, les teneurs en différents métaux (cadmium, cuivre, mercure, plomb et zinc) varient de 0,01 à plusieurs centaines de mg de métal par kg de particules sèches : il est donc courant de les normaliser à des valeurs de référence, en général au niveau du bruit de fond naturel des particules transportées par la rivière.

Le bruit de fond naturel* dans le bassin de la Seine peut varier suivant le type de minéraux présents dans les sédiments.

Il a été approché de trois façons :

- pour l'ensemble du bassin, par l'analyse des dépôts fluviaux datés de plus de 4 000 ans à Paris-Bercy et dans l'estuaire ;
- à chaque station, par reconstitution de la valeur moyenne annuelle sur la base des types de roches des sous-bassins (lithologie) et des teneurs moyennes en métaux de chaque type de roche susceptible d'être érodée ;
- pour chaque échantillon de particules (matières en suspension filtrées ou collectées en trappes, sédiments...), par l'assemblage minéralogique, pour autant que l'on dispose des teneurs en carbone organique, en carbonates et en aluminium.

Il est ainsi possible de calculer le facteur d'enrichissement métallique EF* pour chaque échantillon de matériel particulaire, par comparaison avec le bruit de fond naturel* qui sert de référence à cet échantillon (tableau 2).

Ces distinctions entre bruits de fond sont significatives dans les bassins à l'amont de Paris mais s'estompent lorsque la contamination croît.



Carotte* de sédiments de Seine, prélevée à proximité de Chatou : les zones plus foncées sont riches en matière organique et en métaux.

Al	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
33 000	0,22	9	40	15	0,03	16	20	60

Tableau 2 : Niveaux moyens du bruit de fond métallique dans les sédiments naturels du bassin de la Seine (mg/kg).

Distribution spatiale de la contamination métallique, des ruisseaux à l'embouchure

Il est difficile de cartographier un quelconque indicateur de contamination en mélangeant les bassins versants de taille très différente depuis les ruisseaux (10 km²) jusqu'à l'ensemble du bassin versant de la Seine (65 000 km²) par exemple à Poses. Les hydrologues parlent alors d'ordre de Strahler : sa valeur est l'unité ou 1 pour le plus petit ruisseau, deux puis trois pour les cours d'eau un peu plus importants (10 à 100 km²), jusqu'à 7 pour la Seine après sa confluence avec l'Oise.

La valeur moyenne des facteurs d'enrichissement EF des métaux varie avec le taux d'urbanisation (figure 5), lequel augmente généralement avec l'ordre de Strahler dans le bassin de la Seine.

Par définition EF égale 1 dans des bassins forestiers non contaminés.

Il se situe entre 1 et 2 dans les bassins uniquement agricoles à pression de population très limitée (moins de 10 hab/km²) puis atteint 3 très rapidement avec la présence de petites agglomérations (40 à 80 hab/km²) ; 4 voire 5 en milieu péri-urbain peu dense (80 à 120 hab/km²).

Dans les cours d'eau très affectés par la présence urbaine, la contamination continue à croître (ordre de Strahler 6-7) jusqu'à l'aval de Paris (ordre de Strahler 7, 250 hab/km²) et à Poses.

Dans les bassins péri-urbains très denses qui sont traversés par des cours d'eau d'ordre de Strahler inférieur à 5 (Orge, Yerres, Ru de Gally...), le facteur d'enrichissement EF dépasse largement la valeur observée à Poses, en raison de la très forte population (plus de 400 hab/km²).

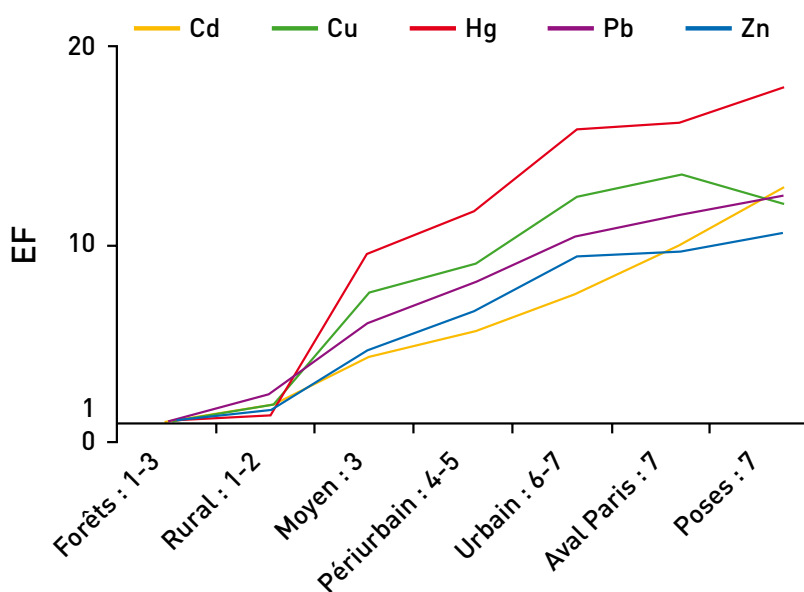


Figure 5 : Évolution longitudinale du facteur d'enrichissement moyen (EF) du cadmium, cuivre, mercure, plomb et zinc en fonction de l'ordre de Strahler (1 à 7) des cours d'eau du bassin de la Seine entre 1994 et 1996. Matières en suspension collectées par trappes.

Les zones estuariennes, du fait de leur position et de leurs caractéristiques, sont souvent très convoitées par l'homme, aussi bien pour l'habitat, l'exploitation des ressources halieutiques que pour l'installation de ports et le développement d'activités agricoles et industrielles.

Au niveau européen, l'estuaire de la Seine est un exemple type de pressions humaines multiples tant sur le bassin versant qu'en bordure de l'estuaire et d'usages estuariens très diversifiés. C'est le domaine d'investigation du programme scientifique Seine-Aval.

SUR QUELS SUPPORTS ANALYSER LES MÉTAUX ?

Poser une question comme « la Seine est-elle contaminée en métaux ? » entraîne le scientifique à préciser les questions « où ? », « quand ? », « pour quels métaux ? », « par rapport à quelle référence ? », tant le problème est complexe.

La Seine et ses affluents présentent des débits naturels assez faibles et surtout un transport en matières en suspension (10 tonnes/km²/an) très inférieur à la moyenne mondiale (200 t/km²/an) : les facteurs de dilution sont donc naturellement limités.

Comme la pression humaine liée à l'agglomération parisienne (9,5 M hab pour 90 m³/s en basses eaux après soutien d'étiage) est en outre très forte par rapport à celle qui s'exerce sur les autres fleuves français (Rhône, Garonne) ou européens (Pô, Danube), il en résulte une forte contamination en métaux. Celle-ci dépend de la localisation, plus exactement de l'ordre de Strahler (figure 5). Elle varie également dans le temps et en fonction de la saison.

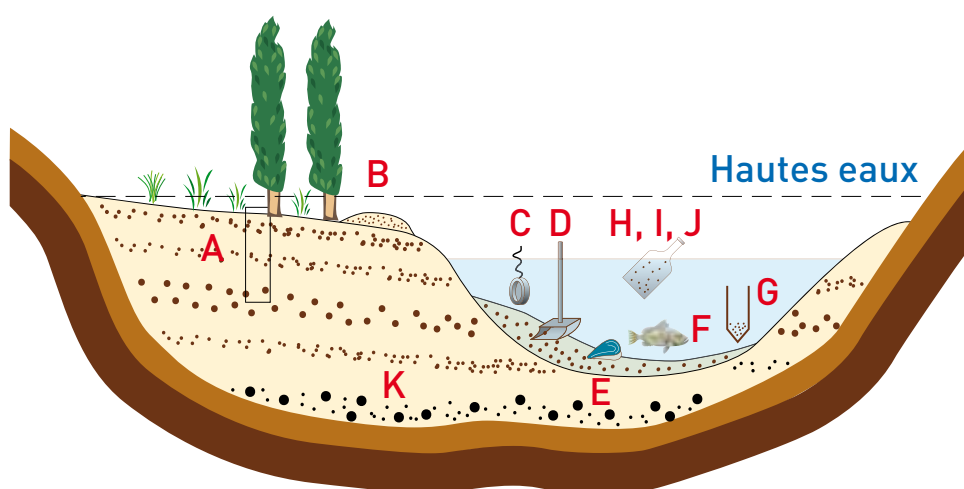


Figure 6 : Comment décrire la contamination métallique dans un bassin fluvial ?

Pour cela, le PIREN-Seine a développé des techniques nouvelles comme les DGT* (voir « En savoir plus » page 27) et des stratégies de surveillance diversifiées sur supports variés : eau, organismes aquatiques, matières particulaires diverses (carottes*, trappes à sédiments, laisses de crues).

- Les sédiments récents (A) déposés dans la plaine alluviale depuis plus de 50 ans sont prélevés par carottages. On peut ainsi reconstituer l'évolution à long terme de la contamination des matières en suspension transportées avant le début de leur surveillance, en 1983 pour la Seine.
- Les laisses de crues* (B) déposées annuellement sont aussi suivies à des stations clé depuis quelques années.
- Les dispositifs DGT (C) nous renseignent sur les fractions dissoutes* biodisponibles.

D'autres organismes publics participent également à la surveillance de la Seine :

- les sédiments* du lit mineur (D) sont suivis depuis une vingtaine d'années aux stations du Réseau National de Bassin (RNB) par le Service de Navigation de la Seine (SNS) et l'Agence de l'eau Seine-Normandie, et ont aussi fait l'objet d'études spécifiques du PIREN-Seine, dans l'agglomération parisienne, par exemple ;
- la contamination des organismes benthiques* (E) ou pélagiques* (F) a été peu étudiée jusqu'à présent ; le seul suivi est celui du SIAAP à l'aval de Paris. En baie de Seine, en revanche, le Réseau National d'Observation du milieu côtier (RNO) suit les moules à Villerville et au Havre depuis 1979 ;
- plusieurs sites ont fait l'objet de suivi saisonnier par trappes à matières en suspension* (G) par les chercheurs du PIREN-Seine ;
- les analyses sur eau brute (échantillons H) sont surtout effectuées par les producteurs d'eau potable à leurs prises d'eau, celles sur eau filtrée à 0,45 µm (I) par les chercheurs (Ifremer, PIREN-Seine, Seine-Aval) ;
- les matières en suspension filtrées (J) sont suivies dans le cadre du Réseau National de Bassin à la station de « bouclage du bassin » (Poses) par le Service de Navigation de la Seine et l'Agence de l'eau Seine-Normandie depuis 1983, ce qui permet de calculer avec précision des flux exportés par le fleuve ;
- enfin le bruit de fond naturel* du bassin a été déterminé sur des sédiments alluviaux de 4 000 ans d'âge (K) par les chercheurs du PIREN-Seine (tableau 2, page 19).

Impact induit par l'agglomération parisienne sur le cycle saisonnier de la contamination fluviale

Dans le cas de rejets en métaux provenant de sources ponctuelles, on observe des contaminations des matières en suspension plus élevées en période d'étiage estival qu'en période de hautes eaux hivernales.

La contamination générale en métaux dans le bassin a été déterminée grâce à un indice de pollution multi métallique, MPI*. Il correspond à un facteur d'enrichissement moyen en cadmium, cuivre, mercure, plomb et zinc dans chaque échantillon* prélevé par rapport à une teneur théorique naturelle déterminée à partir de l'assemblage minéralogique de chaque échantillon.

Le MPI permet la comparaison de tous les échantillons de matière particulaire : matières en suspension, sédiments déposés, sédiments anciens et particules collectées par des trappes.



Trappe à matières en suspension maintenue hors d'eau avant d'être placée en Seine pour des durées de collecte comprises entre 24 h et une dizaine de jours.

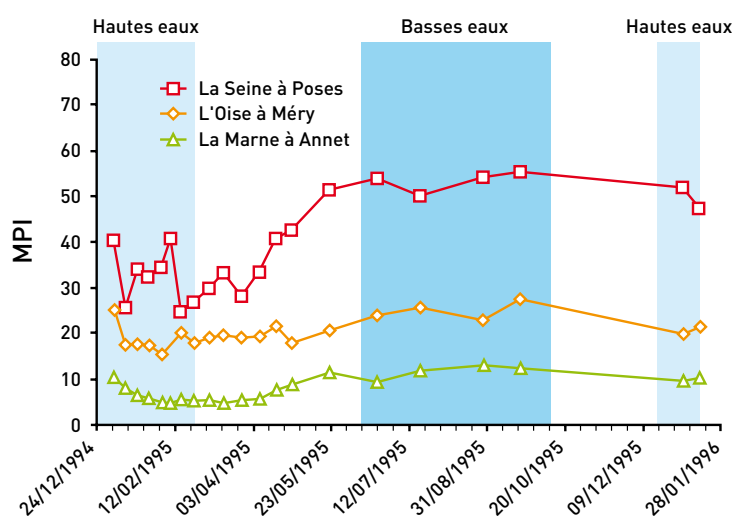


Figure 7 : Variations saisonnières de l'indice de pollution multi métallique (MPI) des matières en suspension collectées par trappes à Annet (Marne), Méry (Oise) et Poses (Seine) en 1995 (Figure 2, page 13).

Les variations saisonnières de l'indice de pollution multi métallique MPI* ont été déterminées sur 3 trappes à sédiments posées et relevées 21 fois pendant l'année 1995, sur trois stations :

- Annet-sur-Marne, à l'amont de l'agglomération parisienne,
- Méry-sur-Oise, non influencée par celle-ci,
- Poses, située à l'entrée de l'estuaire.

Elles sont présentées en [figure 7](#).

Les variations saisonnières sont faibles à l'amont de Paris (Annet et Méry-sur-Oise). Elles résultent de la dilution, faible en basses eaux estivales et fortes en hautes eaux hivernales, des rejets urbains peu abondants par des particules érodées depuis les bassins amont peu contaminés.

À l'aval de Paris (station de Poses), les teneurs moyennes en métaux sont beaucoup plus fortes et le cycle saisonnier est très marqué, ce qui s'explique par les rejets de la station d'épuration de Seine-Aval qui traite les eaux usées d'environ 8 millions d'habitants.

Pendant la période estivale, une partie des particules contaminées des rejets urbains s'accumulent dans les sédiments à l'aval de l'agglomération parisienne. Ces sédiments sont ensuite chassés vers l'estuaire lors des épisodes de crue hivernale et sont remplacés, à l'aval de Paris, par des particules moins contaminées issues des bassins versants amont.

La comparaison des indices de pollution multi métallique montre qu'en 1995, la qualité des matières en suspension estivales de Poses était proche de celle des effluents de la station d'épuration Seine-Aval. À l'opposé, les particules fluviales collectées par les trappes en hautes eaux en hiver à Annet présentaient des valeurs de MPI 20 fois plus faibles.

La contamination métallique dépend donc de la station mais aussi de la saison.

Toutefois, comme le montre la comparaison de ces 3 sites, Mega Paris* joue un rôle essentiel dans la contamination de la Seine, tant par ses rejets ponctuels (eaux traitées par les stations d'épuration) que diffus (rejets par temps de pluie, fuites des stocks urbains ou industriels).

Il est donc impossible d'estimer l'impact instantané de Méga Paris sur la qualité de la Seine et des particules qu'elle charrie sans une bonne connaissance de ces phénomènes saisonniers.

Par contre cette alternance de dépôts estivaux et de chasses hivernales ne modifie pas les flux inter-annuels de métaux, principalement d'origine urbaine et industrielle car ils se retrouvent, plus ou moins rapidement, à l'estuaire, à l'exception des alluvions déposées dans la plaine d'inondation qui représentent une faible proportion de ces bilans.



Quai de Seine, Paris.



La fraction biodisponible des métaux en vue d'évaluer leur **impact écotoxicologique**

Avec la Directive Cadre européenne sur l'Eau de 2000, c'est à l'aune de « l'état écologique » des cours d'eau qu'est évalué le niveau de contaminants admissible. Cette évolution amène *de facto* à prendre en compte la biodisponibilité des micropolluants.



Les métaux se trouvent sous différentes formes (fraction particulaire, dissoute, libre, labile, biodisponible, toxique...) dans le milieu aquatique et ce sont des mesures opérationnelles qui permettent de les distinguer :

- la filtration permet de séparer les métaux dissous* des métaux associés aux matières en suspension (particulaires*) ;
- au sein de la fraction dissoute, la technique d'échantillonnage par capteur DGT* ou Gradient de Diffusion en Couche Mince permet de séparer *in situ* les métaux dissous labiles*, c'est-à-dire l'ion libre*, les complexes* minéraux (inorganiques), et les complexes organiques peu stables (voir encart page 27). Cette définition dépend du type de capteur DGT utilisé.

La figure 8 permet de positionner ces différentes fractions pour le cas du cuivre. On considère que les métaux labiles constituent une estimation de la fraction biodisponible* des métaux. Celle-ci varie selon le type d'organisme biologique et le niveau de contamination. Elle comprend généralement le métal associé à des ions minéraux et une partie des complexes labiles. Sur ce schéma, l'épaisseur de la flèche grise symbolise la fluctuation de la frontière entre dissous labile et dissous non labile.

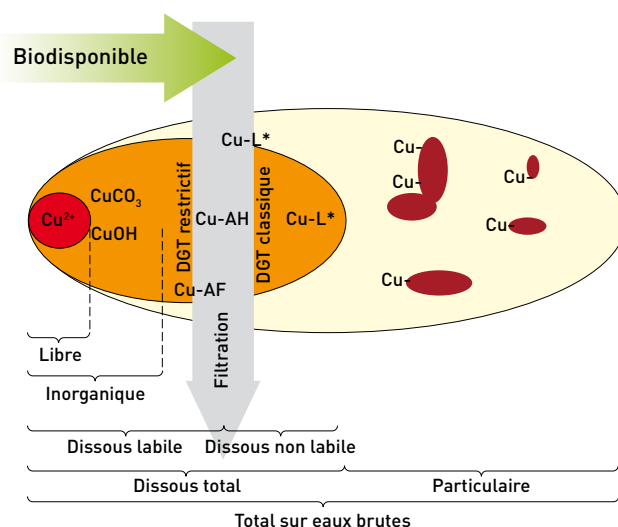


Figure 8 : Formes prises par les métaux dans un système fluvial : cas du cuivre.

La filtration (conventionnellement réalisée à 0,45 µm), permet de séparer les fractions dissoute et particulaire. Au sein de la fraction dissoute, la DGT ou Gradient de Diffusion en Couche Mince sépare la fraction la plus labile* et donc la plus susceptible d'être biodisponible. Cu-AH et Cu-AF : complexes organiques avec les acides humiques et fulviques ; Cu-L : autres complexes non biodisponibles.

LES NOTIONS CLÉS

Les métaux et la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE*)

La Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE, 2000/60/CE du 23 octobre 2000) pose les bases d'une gestion des ressources aquatiques unifiée au niveau européen. Les États membres s'engagent à protéger, améliorer, restaurer les masses d'eau, dans l'objectif de retrouver un bon état écologique à l'échéance 2015 (éventuellement 2021 ou 2027 en cas de trop fortes contraintes techniques ou économiques).

Parmi les armes de lutte contre la pollution, figure la liste de substances prioritaires* présentant un risque significatif pour ou via l'environnement aquatique, déterminée par le parlement européen. Ces substances sont soumises à des contrôles particuliers des rejets dans l'eau, à des normes de qualité environnementale et à un programme spécifique de réduction des rejets. Au sein de cette liste, certaines sont qualifiées de dangereuses prioritaires. Pour celles-ci, les actions mises en place visent à arrêter ou supprimer progressivement les rejets, les émissions et les pertes. Pour les métaux, l'objectif des actions est de retrouver un niveau représentatif du fond géochimique naturel.

Pour l'instant, 4 métaux font partie des substances prioritaires : le cadmium, le mercure, le nickel et le plomb. Les 2 premiers sont des substances prioritaires dangereuses. À ce titre, leur rejet doit être supprimé de façon à ce que leur concentration dans l'eau revienne au niveau du bruit de fond naturel*.

La liste des substances prioritaires ainsi que leur classification comme dangereuses n'est pas figée. Plusieurs substances sont actuellement en cours d'évaluation, le cuivre par exemple.

Les métaux font donc partie des substances dont il faut mesurer les concentrations dans les milieux aquatiques pour évaluer leurs niveaux de contamination et par là même leur impact écologique potentiel. Pour cela, bien que la réglementation actuelle ne l'impose pas, il nous semble indispensable de mesurer les métaux biodisponibles*, c'est-à-dire susceptibles d'interagir avec les organismes vivants.

Des normes de qualité environnementale (NQE*), basées sur les concentrations dissoutes, ont été fixées par la directive « fille » du 17 juin 2008 (voir « En savoir plus », page 33).

Les résultats des études pilotes sur la Seine (figure 10, page 28) montrent que si les concentrations de cadmium et de nickel dissous semblent bien inférieures aux NQE, il n'en est pas partout de même pour le cuivre et le cobalt dissous si l'on se réfère à la circulaire 2007/23. Cette circulaire définit des normes de qualité environnementale provisoires : 1,4 µg/l pour le cuivre et 0,3 µg/l pour le cobalt (valeurs auxquelles doivent être ajoutés les bruits de fond naturels* estimés respectivement à 0,08 et 0,12 µg/l pour calculer la concentration maximale admissible – CMA – par le milieu). Des campagnes de mesure par les équipes du PIREN-Seine sont en cours pour valider ces premiers résultats.

DGT et biotests : des approches efficaces mais délicates

Un des enjeux actuels du PIREN-Seine (2007-2010) consiste à acquérir des chroniques de métaux dissous biodisponibles* en Seine. La concentration en métal libre* cationique (Cu^{2+} dans le cas du cuivre) contrôle le plus souvent la biodisponibilité d'un métal, et donc sa toxicité. Plutôt que le métal total (somme des fractions dissoutes* et fixées sur les matières en suspension*), c'est donc ce paramètre qu'il convient d'évaluer dans l'eau brute, voire dans l'eau filtrée, pour évaluer son éventuelle toxicité (voir figure 8, page 25).

Cela pose malheureusement de grosses difficultés techniques pour deux raisons principales : d'une part, la fraction de métal libre est généralement très faible par rapport au métal total des eaux brutes, et donc forcément difficile à détecter. D'autre part, il est difficile de séparer strictement les fractions libres des autres formes de métal dissous.

Différentes méthodes existent, en particulier électrochimiques. Ces techniques restent l'affaire de spécialistes et ne sont pas directement applicables, pour la plupart, dans des milieux aquatiques très contaminés. De plus elles sont rarement assez sensibles. De ce fait, assez peu de mesures ont été réalisées en Seine, non seulement sur la fraction libre des métaux, mais également sur la totalité des métaux dissous. L'estuaire a, par contre, été plus suivi sur les métaux dissous (voir page 31).

Dans les années 90, différents types de capteurs passifs sont apparus, dont, pour les métaux, la technique du gradient de diffusion en couche mince (DGT*). Cette technique est robuste et permet d'échantillonner, *in situ* sans perturbation de l'échantillon*, les métaux labiles*, c'est à dire les métaux cationiques libres et une partie des complexes* dissous en milieu marin, lacustre, fluvial, et même dans les eaux usées.

De façon générale, cette méthode DGT a permis de montrer que la fraction toxique du cuivre pouvait être estimée de façon fiable par des mesures de cuivre labile dans les cours d'eau de tête de bassin, où la matière organique est essentiellement d'origine humique, c'est-à-dire résultant de la décomposition des végétaux.

En aval, en revanche, où se produisent les floraisons phytoplanctoniques et où sont rejetés les effluents de station d'épuration, la comparaison des biotests et des essais avec la DGT nous ont montré que la fraction toxique du cuivre est alors généralement surestimée par la concentration en cuivre labile.

Notons que ces résultats ont été obtenus pour des concentrations en métaux élevées (létales), rarement observées dans le milieu naturel. À des niveaux plus réalistes, la fraction biodisponible des métaux (et non nécessairement létale) pourrait être plus proche de la fraction labile.



AU PLUS PRÈS DE LA BIODISPONIBILITÉ EN UTILISANT LE GRADIENT DE DIFFUSION EN COUCHE MINCE (DGT)

L'échantillonneur passif DGT (« Diffusive Gradient in Thin film ») permet de surveiller le niveau de contamination en métaux labiles*, sur des périodes de plusieurs semaines, par un dispositif de prélèvement passif placé directement dans la rivière, puis relevé et analysé au laboratoire. Il est constitué de deux gels, l'un chélatant, c'est-à-dire complexant* fortement les ions métalliques qui l'atteignent, l'autre diffusif, c'est-à-dire permettant le transport naturel d'espèces métalliques depuis le milieu aquatique vers le gel chélatant. Ces deux gels sont superposés sur un support en plastique et maintenus par une bague. Le gel de diffusion*, en contact avec l'échantillon, contrôle la vitesse d'accès des métaux au gel chélatant, où les formes cationiques sont fixées irréversiblement et s'accumulent au cours du temps.

On peut démontrer que la vitesse d'accumulation des cations métalliques sur le gel chélatant dépend à la fois de la concentration en métal labile en solution, de l'épaisseur du gel de diffusion et du coefficient de diffusion du métal dans le gel. Cette vitesse d'accumulation est estimée en mesurant, pour différentes durées de contact de l'échantillonneur avec le milieu aquatique considéré, la quantité de métal accumulée sur le gel chélatant.

La concentration en métal labile ainsi obtenue est supérieure à la concentration en métal cationique libre*, car certains complexes métalliques peu stables se dissocient dans le gel de diffusion, libérant des formes cationiques qui sont piégées sur le gel chélatant (voir figure 8, page 25). Plus le gel de diffusion utilisé est épais, plus le temps de séjour des complexes y sera élevé, et plus importante sera leur dissociation.



La fraction labile des métaux dissous est donc directement liée au dispositif expérimental et à ses conditions d'utilisation qui doivent être étalonnées.

Les avantages opérationnels de la DGT sont importants :

- les cations métalliques s'accumulent dans le gel chélatant, leur détermination est beaucoup plus sensible que dans les analyses courantes des métaux dissous totaux ;
- l'échantillonnage est multi-éléments et intégratif dans le temps, ce qui signifie que le résultat apporte des informations sur les contaminations à la fois permanentes et transitoires pendant la durée d'immersion des DGT dans le milieu : les concentrations en métaux labiles sont ainsi lissées ;
- les analyses sont réalisées après élution acide de la résine chélatante, ce qui élimine les problèmes d'interférences analytiques rencontrés avec des échantillons de métaux dissous dans la matrice environnementale.



Figure 9 : Dispositifs DGT permettant d'échantillonner les métaux dissous labiles : préparation au laboratoire et immersion dans le milieu aquatique, ici une station d'épuration des eaux usées.

Évolution amont-aval des concentrations en métaux dissous et labiles

Les valeurs des concentrations moyennes en métaux dissous* totaux et labiles*, déterminées par DGT* sur le bassin de la Seine pendant la période 2002-2004 montrent que cette contamination augmente significativement de l'amont vers l'aval du bassin [figure 10] depuis la station du Theil (petit cours d'eau forestier situé sur le bassin de la Marne) jusqu'à la station d'Andrésey (Seine, à l'aval de la confluence Oise-Seine).

Néanmoins, pour le cadmium, l'augmentation de la fraction labile, de l'amont vers l'aval, est moins marquée.

Ces augmentations reflètent probablement la présence d'une multitude d'apports diffus (en particulier le ruissellement sur les surfaces urbaines ou agricoles contaminées) et de rejets ponctuels, urbains et industriels.

Ainsi, en ce qui concerne le cuivre et le nickel, les flux de métaux labiles rejetés par la station d'épuration Seine-Aval, entre Chatou et Andrésey, sont du même ordre de grandeur que ceux qui transitent dans le fleuve en amont de ce rejet. En revanche, les flux de cadmium dissous et de cobalt labile de ce rejet ne sont pas quantifiables, ce qui laisse supposer que les sources dominantes de ces métaux sont diffuses.

Contrairement aux mesures des fractions labiles lissées par les mesures de DGT (voir page 27), la variabilité temporelle des concentrations en métaux dissous, mesurées sur des prélèvements instantanés, est importante en Seine : il est probable que ces variations résultent d'une combinaison de rejets de ruissellement pluvial sur des surfaces contaminées et de relargage de métaux dissous par des sédiments contaminés lors d'épisodes de très faible oxygénation fluviale.

Andrésey.



Chatou.



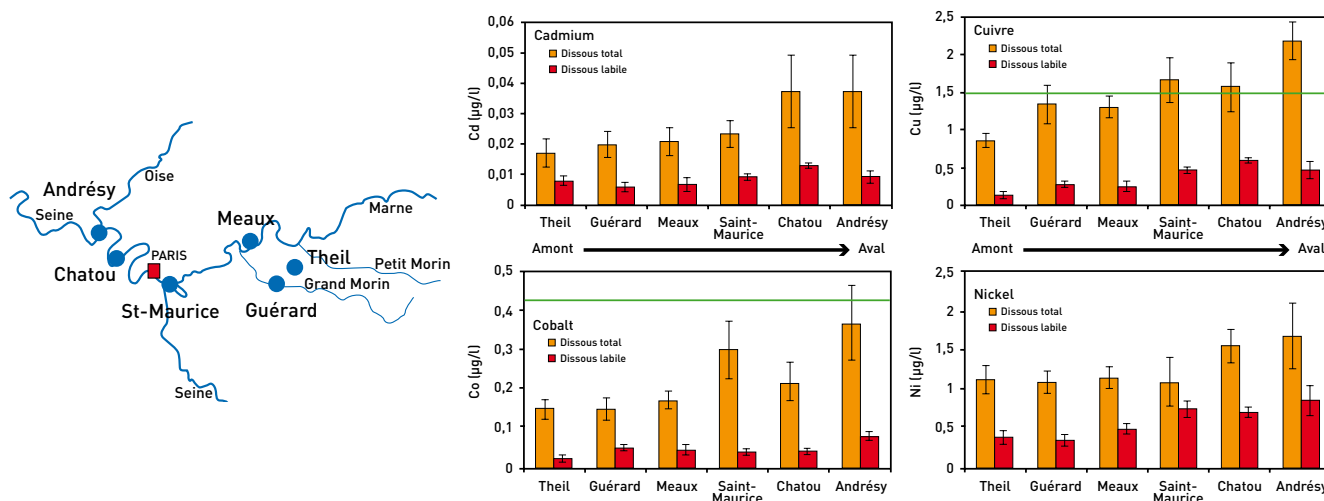
Saint-Maurice.



Guérard.



Theil.



L'épuration des métaux dans les eaux urbaines

Les stations d'épuration ne sont pas spécifiquement conçues pour éliminer les métaux des eaux résiduaires urbaines. Le comportement des métaux dans les installations dépend en fait de la distribution de ces fractions dissoutes* et particulaires* dans les eaux brutes.

Pour la station d'épuration Seine-Aval, dans l'effluent brut issu du traitement primaire, 80% du cuivre et du plomb sont associés aux matières en suspension, alors que 80% du nickel est sous forme dissoute et environ 50% labile* (figure 11).

Le rendement total d'épuration sur les métaux est généralement élevé (supérieur à 75%) : il résulte en fait de la décantation des matières en suspension sur lesquels de nombreux métaux sont fixés.

En revanche, les fractions dissoutes et labiles sont moins bien retenues par les stations d'épuration, qui sont généralement optimisées pour le traitement du carbone, de l'azote et du phosphore. En sortie du traitement biologique, on trouve ainsi encore 75% du nickel dissous des eaux résiduaires. De plus, l'ajout de réactif – ici du chlorure ferrique – pour provoquer la floculation en traitement tertiaire de déphosphatation peut se révéler être une source de métaux (impuretés) non négligeable : pour le nickel, cet ajout compense l'efficacité du traitement.

Mis à part le nickel, les concentrations en métaux labiles dans les eaux traitées sont généralement faibles, voire non quantifiables ou non détectables.

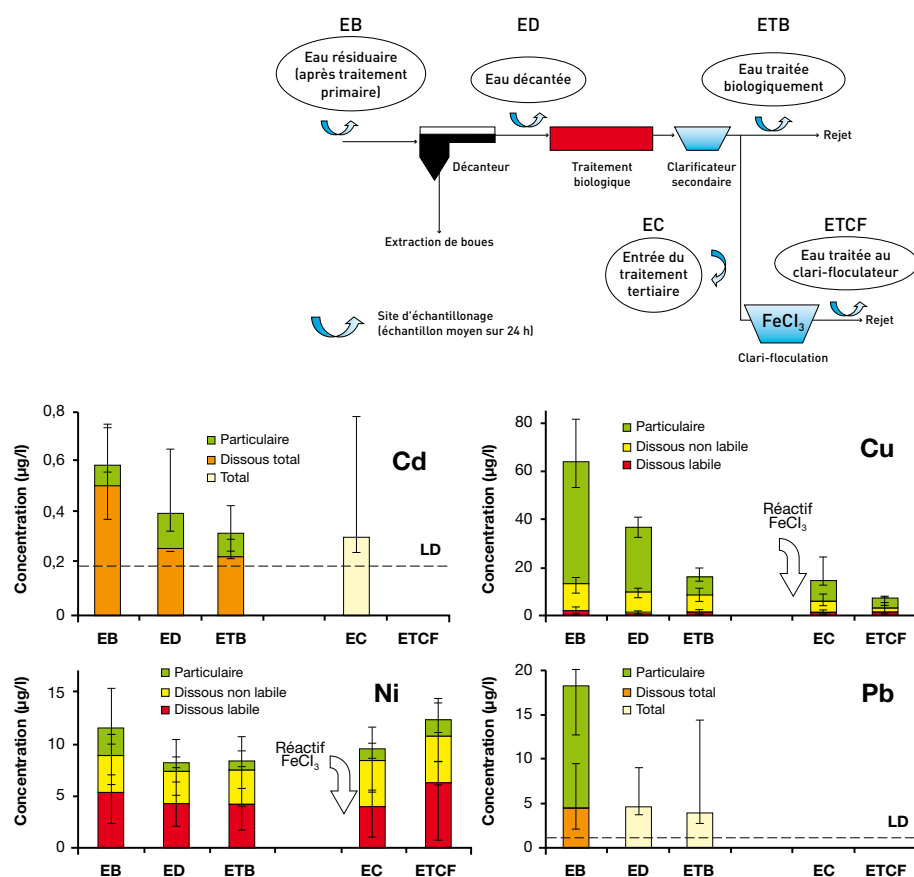


Figure 11 : Photo aérienne de la station d'épuration Seine-Aval (STEP-SA) et schéma des filières de traitement : sites de prélèvement d'échantillons* moyens sur 24 h. Valeurs médianes ($\mu g/l$) et variabilité (barres verticales noires) des concentrations en métaux dans les eaux usées au cours de leur traitement : fractions particulaires, dissoutes non-labiles et dissoutes labiles. Principaux stades de traitement des eaux usées : eau brute issue du traitement primaire (EB), décantée (ED), traitée biologiquement (ETB), après clarification (EC) et en sortie du traitement final de clari-floculation (ETCF). $FeCl_3$: représente l'apport de métaux par les réactifs de clari-floculation. LD : limite de détection du métal considéré.

Aujourd'hui l'épandage agricole des boues traitées de l'usine de Seine-Aval soit 41 000 t de matière sèche par an, est réalisé selon des plans précis de rotation des parcelles réparties sur de grands territoires : son impact est donc limité et du même ordre de grandeur que celui des retombées atmosphériques de la région parisienne ou, pour le cadmium, de l'utilisation d'engrais phosphatés qui en sont riches (figure 14, page 36).

Il n'en était pas de même des effluents liquides de l'agglomération parisienne qui ont été épandus pendant un siècle sur des sols agricoles et forestiers du plateau de Pierrelaye (Achères), générant ainsi une très forte contamination locale des sols, en cours d'étude.



Épuration des eaux usées domestiques : un mastodonte, la station d'épuration de Seine-Aval (STEP S-A) à Achères

La station d'épuration des eaux usées Seine-Aval à Achères a collecté et traité, jusqu'au milieu des années 1990, les effluents de 8 millions de Franciliens (aujourd'hui 6,5 millions), ce qui en fait la plus grande usine d'épuration d'Europe et la seconde au monde (figure 2, page 13).

Elle est située à près de 80 km à l'aval de Paris, juste en amont de la confluence entre la Seine et l'Oise.

Les débits rejetés après traitement atteignent en moyenne 25 m³/s, soit le quart du débit de la Seine à l'étiage après soutien par les barrages réservoirs situés à 200 km en amont.

Les eaux traitées par cette usine proviennent de sources multiples : égouts domestiques, industries raccordées au réseau et eaux de ruissellement urbain (une partie seulement en période de fortes pluies).

Les sources de métaux y sont donc multiples et, vu la taille de la surface collectée (voisine de 2 500 km²) et la population raccordée, l'usine Seine-Aval est sans doute bien représentative des effluents mixtes, urbains (eaux domestiques et ruissellement sur les chaussées et toitures) et industriels, générés en France. Elle ne collecte toutefois pas d'effluents miniers, cette activité étant absente du bassin de la Seine.

L'impact des rejets de l'usine Seine-Aval est considérable du seul fait du rapport débits traités / débit fluvial récepteur : il faudrait donc des efficacités d'abattement des métaux et des autres substances polluantes ou indésirables, de bien plus de 99% pour que cet impact soit négligeable (une efficacité de 99% revient à rejeter sans traitement les eaux usées de 65 000 équivalents-habitants).

Le Syndicat Interdépartemental pour L'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP), qui gère l'usine de Seine-Aval, a été la première institution du bassin, et peut-être en France, à mettre en place une surveillance régulière de la contamination métallique des eaux usées brutes et traitées, et des boues de traitement biologique. Ces dernières, après traitement et séchage, sont utilisées en amendement agricole depuis des décennies, du fait de leur grande richesse en carbone organique, phosphore et azote (flux F, figure 3, page 14).

Le pic du cadmium dissous dans l'estuaire de la Seine : un phénomène explicable

Lorsque l'on mesure le cadmium dissous le long de l'estuaire de la Seine, on observe une augmentation très marquée, caractéristique de cet élément, observée dans de nombreux estuaires macrotidaux* du même type (Loire, Gironde, Escaut) où l'influence de la marée dynamique se fait ressentir très en amont (jusqu'à 150 km de la ligne de côte dans le cas de la Seine), et génère un maximum de turbidité de l'ordre du g/l de matières en suspension (MES*) et des zones de dépôt de vases très importantes (figure 12).

De tous les milieux aquatiques, les estuaires macrotidaux présentent la plus grande variabilité des facteurs physico-chimiques et biologiques qui contrôlent les espèces chimiques de métaux (pH*, potentiel d'oxydo-réduction*, salinité*, agents complexants* et composition des particules). Ces facteurs, du fait du cycle des marées, des crues..., présentent des variations temporelles et spatiales multiples, d'amont à l'aval, du centre de l'estuaire à ses vasières. Par exemple la salinité varie de 0,5 à 35‰ et les matières en suspension évoluent de 20 mg/l en amont à 10 g/l dans la couche de vase fluide qui oscille avec les marées au centre de l'estuaire, pour redescendre à quelques mg/l en baie de Seine.



Figure 12 : Vasière dans l'estuaire de la Seine, site de solubilisation de cadmium particulaire.

Le comportement des contaminants au cours du transit estuarien peut être classé de façon schématique : conservatif (comportement d'un élément qui va « passer à travers » un estuaire sans changer de phase, comme le sodium dissous ou l'aluminium particulaire) ou non-conservatif (lorsqu'il existe un processus qui change la distribution d'un contaminant entre dissous et particulaire, comme pour le cadmium).

Le devenir du cadmium dans l'estuaire de la Seine a été particulièrement étudié dans le cadre du programme de recherche multidisciplinaire Seine-Aval (<http://seine-aval.crihan.fr/>) en raison du fort niveau de contamination dans le bassin et l'estuaire et de la toxicité très élevée de cet élément (tableau 1, page 16).

Dans la Seine, comme dans la plupart des estuaires contaminés (la Gironde par exemple), l'évolution longitudinale des concentrations dissoutes* en fonction de la salinité est caractérisée par une « courbe en cloche » (figure 13A) qui met en évidence un maximum de concentration (200 ng/l) pour les salinités moyennes par rapport aux entrées fluviales (20 ng/l) et à la valeur marine à 35‰ de salinité (30 ng/l). La plupart des études menées sur le terrain ou en laboratoire attribuent ce maximum très important en cadmium dissous à la désorption du cadmium associé aux particules du fait de la présence de chlorures dans l'estuaire.

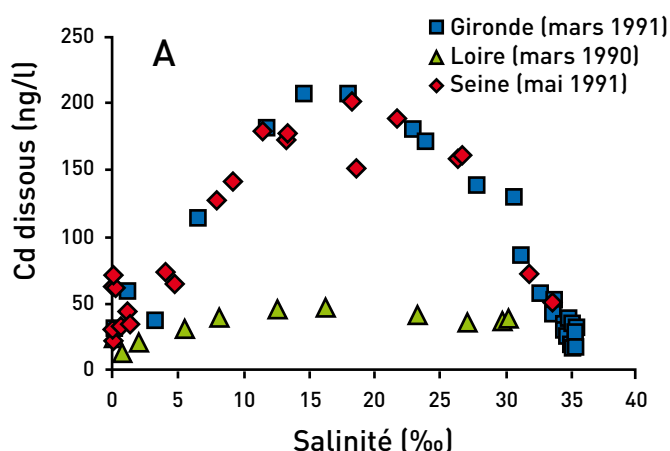


Figure 13A : Évolution des concentrations en cadmium dissous dans l'estuaire en fonction de la salinité (‰) : (A) comparaison des estuaires de la Gironde, de la Loire et de la Seine.

Par ce processus, les apports de la Seine en cadmium dissous*, donc biodisponible*, à la zone côtière sont multipliés par un facteur supérieur à vingt.

Ce processus est spécialement important dans les estuaires macrotidaux*, où le temps de résidence de l'eau et des particules est élevé et où les concentrations en matières en suspension sont très importantes, ainsi que dans les systèmes fluviaux les plus contaminés : dans l'estuaire de la Loire le pic est beaucoup moins marqué (figure 13A, page 31).

En revanche, l'excès de cadmium dissous (par rapport à une simple dilution) est faible à inexistant dans les estuaires microtidaux (marées < 2 m) et relativement peu contaminés comme le Rhône, le Danube ou la Lena en Sibérie.

La « réactivité » du cadmium en milieu estuarien illustre l'importance des processus estuariens sur le devenir de certains contaminants métalliques à l'interface continent-océan et leur impact sur la modification des flux (dissous et particulaires) exportés vers les zones côtières.

Au sein d'un même estuaire, le pic de cadmium dissous peut varier suivant les régimes hydrauliques et les saisons (figure 13B). Il est toujours observé entre 15 et 25‰ de salinité*. Comme la salinité de l'estuaire de la Seine varie avec la marée, ce maximum se déplace deux fois par jour sur des dizaines de kilomètres.

En ce qui concerne les teneurs en cadmium des particules qui décroissent très fortement entre Poses, c'est-à-dire la référence fluviale, et le site à 2‰ de salinité, le processus invoqué est différent. En effet dans cette gamme de salinité, l'augmentation en cadmium dissous n'est pas encore effective, il s'agit là de la dilution des particules fluviales très contaminées par un stock ancien de particules estuariennes beaucoup moins contaminées, du fait, d'ailleurs, de la désorption générale du cadmium liée aux particules, en dépit des apports directs du cadmium dans l'estuaire, importants dans les années 1985-1995.

D'autres processus peuvent aussi contribuer à la modification de la spéciation* du cadmium et à sa remise en solution en milieu estuarien :

- le flux de cadmium à partir des sédiments de vasières vers la colonne d'eau,
- la minéralisation du cadmium associé aux oxydes de fer et à la matière organique dans le bouchon vaseux au maximum de turbidité.

Ces processus ont fait l'objet d'études spécifiques et d'un modèle de complexation de surface (MOCO) dans le cadre du programme Seine-Aval (<http://seine-aval.crihan.fr/>).

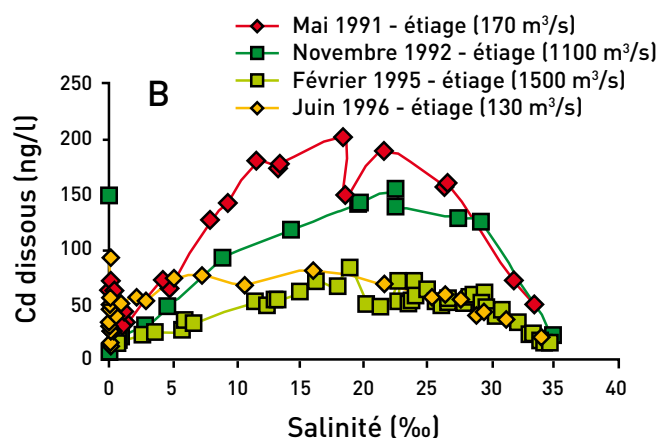


Figure 13B : Évolution des concentrations en cadmium dissous dans l'estuaire en fonction de la salinité (‰) : (B) évolution saisonnière dans l'estuaire de la Seine. Ces données ont été acquises dans le cadre du programme Seine-Aval.



NORMES DE QUALITÉ ENVIRONNEMENTALE

Très récemment, une directive européenne a établi des normes de qualité environnementale (NQE*) dans le domaine de l'eau et modifié la directive 2000/60/CE : elle a été adoptée par le Parlement européen le 17 juin 2008 (www.europarl.europa.eu/). Celle-ci précise que pour le cadmium, le mercure, le plomb et le nickel, les concentrations utilisées ne seront pas, comme pour les autres polluants prioritaires, les concentrations totales dans l'eau mais celles dissoutes*, mesurées après passage à travers un filtre de 0,45 µm de diamètre de pores ou par tout autre traitement préliminaire équivalent.

Le **Tableau 3** présente les NQE de ces 4 éléments pour les eaux de surfaces intérieures (les rivières et les lacs et les canaux et réservoirs qui y sont reliés) et les autres eaux de surface (les eaux côtières et les estuaires). Les NQE sont exprimées en valeur moyenne annuelle (NQE-MA) et en concentration maximale admissible (NQE-CMA). Lorsque les NQE-CMA sont indiquées comme étant « sans objet », les valeurs retenues pour les NQE-MA sont considérées comme celles assurant une protection contre les pics de pollution à court terme dans les rejets continus, dans la mesure où elles sont nettement inférieures à celles définies sur la base de la toxicité aiguë.

Cette directive européenne autorise les États membres à prendre en compte :

1. les bruits de fond naturels* métalliques. S'ils entravent la conformité avec la valeur fixée dans les NQE; la concentration maximale admissible dans le milieu est obtenue dans ce cas en ajoutant les bruits de fond* sur eau aux NQE;
2. la dureté, c'est-à-dire la concentration en calcium et magnésium, le pH* ou d'autres paramètres liés à la qualité de l'eau qui affectent la biodisponibilité des métaux.

La directive offre aussi la possibilité d'établir et d'appliquer des NQE aux sédiments et/ou aux compartiments biologiques au lieu de celles pour l'eau, sous réserve qu'elles offrent un niveau de protection au moins identique à celui assuré par les NQE pour l'eau. Ainsi pour le mercure, la directive fixe une NQE de 20 µg/kg s'appliquant aux tissus (poids à l'état frais), en choisissant l'indicateur le plus approprié parmi les poissons, mollusques, crustacés et autres organismes aquatiques.

L'estimation du bruit de fond naturel* en cobalt et cuivre dissous (Co : 0,12 µg/l ; Cu : 0,08 µg/l) conduit à des NQEp de 0,42 et 1,5 µg/l pour ces deux métaux dans le bassin de la Seine.

Élément métallique	Dureté de l'eau (mg CaCO ₃ /l)	NQE-MA Eaux de surface intérieures (µg/l)	NQE-MA Autres eaux de surface (µg/l)	NQE-CMA Eaux de surface intérieures (µg/l)	NQE-CMA Autres eaux de surface (µg/l)	Bruit de fond naturel en Seine (µg/l)
Cadmium et ses composés	< 40 40 à < 50 50 à < 100 100 à < 200 ≥ 200	≤ 0,08 0,08 0,09 0,15 0,25	0,2 (sans notion de classe de dureté de l'eau)	≤ 0,45 0,45 0,6 0,9 1,5		0,01
Plomb et ses composés		7,2	7,2	sans objet	sans objet	0,93
Mercure et ses composés		0,05	0,05	0,07	0,07	non disponible
Nickel et ses composés		20	20	sans objet	sans objet	1,9

Tableau 3 : Normes de qualité environnementales (NQE) adoptées par le Parlement européen, le 17 juin 2008, pour les métaux dissous et estimations du bruit de fond naturel pour le bassin de la Seine (µg/l).



Un bilan des métaux

Comme pour d'autres grands fleuves européens, le Rhin par exemple, il est important de réaliser des bilans de matière pour tout un bassin versant afin d'estimer les flux majeurs de métaux et tenter de les restreindre.



Réaliser des bilans de matière implique de traiter des informations de type et de qualité très différentes. Certaines sont acquises à des pas de temps très fins, d'autres sur plusieurs années :

- les données issues de statistiques économiques concernent principalement les quantités de métaux et les bilans de matière liés aux activités urbaines, industrielles et agricoles. Elles incluent aussi le recyclage des métaux, les émissions atmosphériques urbaines et industrielles et la production agricole. Ces flux sont en général acquis au niveau national puis transcrits pour le bassin au prorata de la population, des activités économiques ou de la superficie du bassin ;
- les flux environnementaux ont été déterminés par les équipes de chercheurs du PIREN-Seine et par les organismes et institutions partenaires de ce programme (figure 3, page 14) ; les flux rejetés par les réseaux d'eaux usées ont été produits par les partenaires du PIREN-Seine : ils comprennent des rejets multiples, domestiques, industriels, urbains, de station d'épuration...

- les données calculées combinent souvent les deux jeux précédents sur l'ensemble du bassin (apports atmosphériques, utilisation agricole de boues de station d'épuration d'eaux usées, érosion naturelle des sols, flux anthropiques en rivière résultant de stockage temporaire dans les sols, ou dans les décharges contrôlées urbaines ou industrielles).

Plusieurs types de stockages à long terme sont conceptualisés (figure 14, page 36), mais ne sont pas encore quantifiés : sols forestiers (stock S1), sols cultivés (S4), estuaire (S5), structures urbaines et industrielles et décharges ou sols industriels contaminés (S6 et S7).

D'autres types de stocks ont été estimés : rétention de sédiments dans les barrages amont (voir figure 2, page 13) (S2) ou les plaines alluviales (S3), et mises en dépôt de matériaux de dragage nécessaires au maintien de la navigation fluviale.

Comparaison des principaux flux actuels à l'échelle du bassin

La figure 14 (page 36) et le tableau 4 (page 37) présentent la synthèse des flux annuels moyens (1994-2003) de zinc, cadmium, mercure et plomb apportés actuellement au bassin de la Seine et circulant de l'amont jusqu'à l'estuaire.

Pour le zinc, les retombées atmosphériques corrigées des reprises par érosion éolienne, apportent respectivement 460 et 600 tonnes par an sur les forêts et prairies et sur les sols cultivés du bassin. Ces flux sont donc bien supérieurs à ceux apportés par les engrais (29 t/an) et les épandages de boues de stations d'épuration (83 t/an). Ces flux sont par contre dépassés par ceux résultant des mises en décharge d'ordures ménagères (1 517 t/an) auxquels il faut ajouter les mises en décharge des matériaux issus des chambres à sable des réseaux d'assainissement (163 t/an) et des boues de stations d'épuration (183 t/an) (stocks S6). L'ensemble des apports de zinc sur les sols du bassin s'élève donc à 3 100 t/an.

Les apports directs au milieu aquatique sont plus faibles. Les fuites d'origine humaine des zones rurales, estimées à 5 t/an sont négligeables par rapport à celles

des industries (35 t/an) et surtout celles des zones urbaines : 77 t/an issues des déversoirs d'orage et 134 t/an des rejets de stations d'épuration d'eaux usées domestiques qui peuvent également contenir les eaux usées des industries raccordées.

La comparaison des apports directs au milieu aquatique ($5 + 35 + 77 + 134 = 251$ t/an) et de l'augmentation des flux de zinc dans le bassin entre ceux en tête de bassin (érosion naturelle estimée à 42 t/an) et à Poses (315 t/an de zinc particulaire et 135 t/an de zinc dissous, soit au total 450 t/an), même corrigé des rétentions par les barrages (0,7 t/an), les plaines alluviales (2,5 t/an) ou résultant des dragages nécessités par la navigation fluviale (14 t/an) montre clairement qu'une quantité importante d'apports (140 t/an) n'a pas été prise en compte dans ces bilans moyens ($450 - 42 - 17 - 251 = 140$ t/an).

Les flux de zinc rejetés au milieu aquatique par les villes et les industries (agglomérés dans ce schéma et estimés à $77 + 134 + 35 = 246$ t/an) sont donc nettement supérieurs aux apports annuels de zinc sur les sols par les engrais utilisés dans le bassin, estimés à 29 t/an, mais bien inférieurs à la demande industrielle annuelle de zinc sur le bassin, estimée à 95 000 t/an.

Pour le zinc, comme pour les autres métaux, il est vraisemblable que ces fuites d'origine humaine non comptabilisées résultent des fuites ou de l'érosion des sols cultivés (S4), des déchets urbains (S6) et industriels (S7). Les recherches futures du PIREN-Seine devraient donc s'attacher à vérifier cette hypothèse et tenter d'estimer les flux issus de décharges plus ou moins contrôlées ou de sites industriels contaminés.

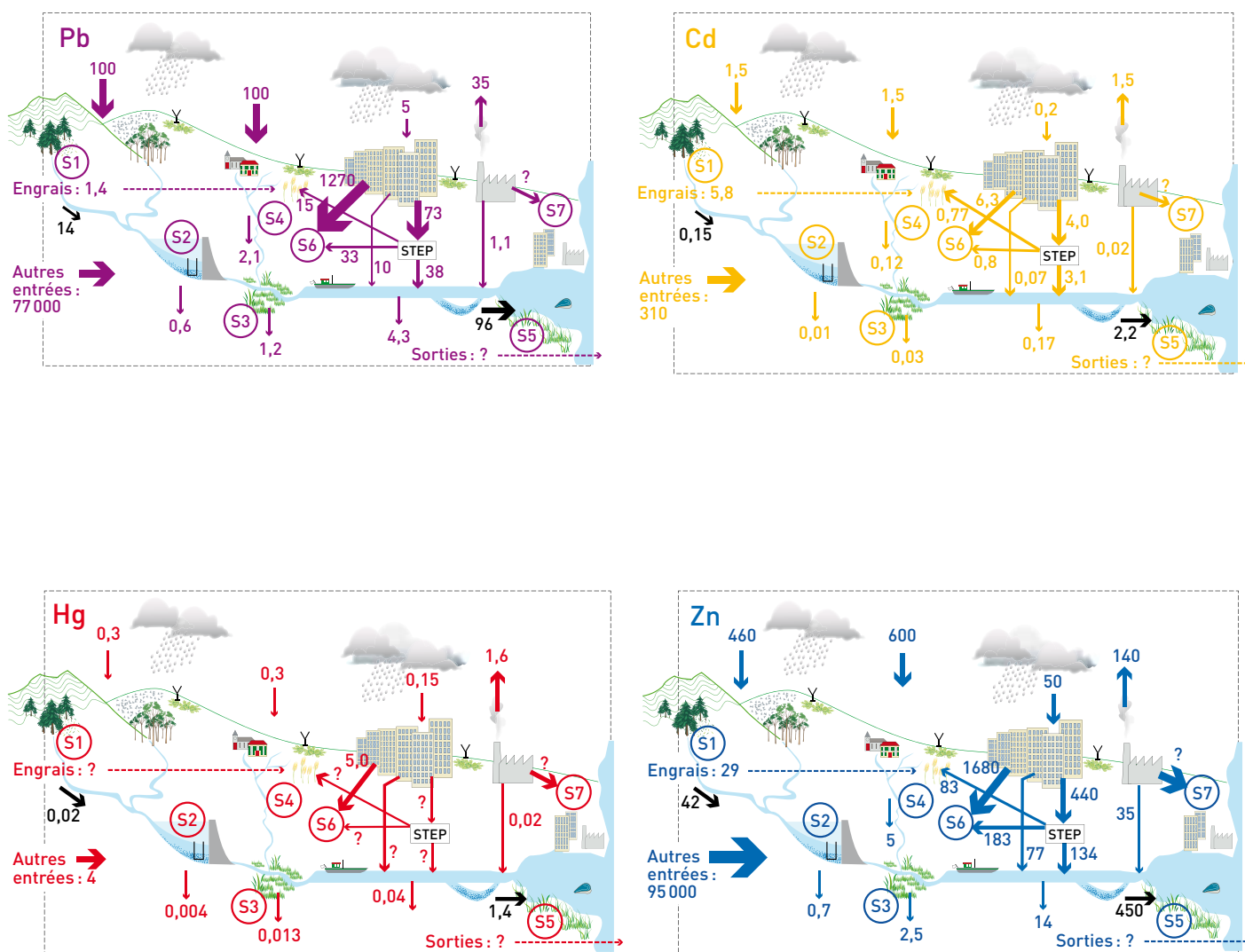


Figure 14 : Sources, transferts et puits (S1 sols forestiers, S2 réservoirs, S3 plaine alluviale, S4 sols cultivés, S5 estuaire, S6 déchets urbains et S7 déchets industriels) de plomb, cadmium, mercure et zinc (t/an) dans le bassin de la Seine (moyenne 1994-2003).

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
A. Apports au bassin versant								
A.1 Apports aux sols								
Dépôts atmosphériques		3,2	9,9	316	0,75	45,6	205	1109
Engrais		5,8	29	7,2		7,2	1,4	29
Epandage de boues de station d'épuration d'eaux usées		0,35	5,1	31		2,0	15	83
<i>Sous-total des apports aux sols</i>	<i>n.d.</i>	<i>9,3</i>	<i>44</i>	<i>355</i>	<i>n.d.</i>	<i>54,7</i>	<i>221</i>	<i>1221</i>
A.2 Stockage et mise en décharge								
Matériaux de dragage fluvial		0,17	4,7	3,1	0,04		4,3	14
Mise en décharge de boues de station d'épuration d'eaux usées		0,77		69			33	183
Mise en décharge de sables de réseau d'assainissement	0,7	0,19	4,0	26,3	0,44	2,6	62	163
Mise en décharge d'ordures domestiques	7,6	6,1	278	1589	4,55	72,8	1206	1517
<i>Sous-total de stockage et mise en décharge</i>	<i>8,3</i>	<i>7,2</i>	<i>286</i>	<i>1688</i>	<i>5,03</i>	<i>75</i>	<i>1305</i>	<i>1876</i>
<i>Sous-total des apports au bassin versant (A.1 + A.2)</i>	<i>n.d.</i>	<i>16,5</i>	<i>n.d.</i>	<i>2042</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>1527</i>	<i>3097</i>
B. Apports directs en rivière								
B.1 Apports généraux								
Erosion naturelle	<i>n.d.</i>	0,15	10,0	10,5	0,02	18,9	14	42
B.2 Fuites anthropiques								
Rejets des zones rurales		0,12		3	0,02		2,1	5
Eau usée rejetée après traitement		3,1		39			38	134
Rejets des déversoirs d'orage		0,07		10			10	77
Rejets industriels directs en rivière	0,2	0,02	5,6	4	0,02	3,2	1,1	35
<i>Sous-total des fuites anthropiques</i>	<i>n.d.</i>	<i>3,3</i>	<i>n.d.</i>	<i>56</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>51</i>	<i>250</i>
<i>Sous-total de l'érosion et des fuites (B.1 + B.2)</i>	<i>n.d.</i>	<i>3,4</i>	<i>n.d.</i>	<i>66</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>65</i>	<i>292</i>
C. Réentions associées à la rivière								
Réservoirs (S2)		0,01	2,3	1,2	0,0045		0,63	0,7
Plaine fluviale (S3)		0,03	3,2	1,70	0,013		1,3	2,5
Dragage fluvial		0,17	4,7	3,1	0,040		4,3	14,0
<i>Sous-total de rétention fluviale</i>	<i>n.d.</i>	<i>0,21</i>	<i>10,2</i>	<i>5,9</i>	<i>0,057</i>	<i>n.d.</i>	<i>6,2</i>	<i>17,2</i>
D. Sortie à l'embouchure (Poses)								
Métaux fixés sur des particules		1,8	87	84	1,25		88	315
Métaux dissous		0,4	17	25	0,12		9	135
Sortie totale	<i>n.d.</i>	<i>2,2</i>	<i>104</i>	<i>109</i>	<i>1,37</i>	<i>n.d.</i>	<i>96</i>	<i>450</i>
<i>Sortie - rétention - érosion / apports directs en rivière [(D - C - B.1) / B.2] [%]</i>	<i>n.d.</i>	<i>56%</i>	<i>n.d.</i>	<i>166%</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>150%</i>	<i>156%</i>
<i>Sortie - rétention - érosion / apports au bassin et en rivière [(D - C - B.1) / (A + B.2)] [%]</i>	<i>n.d.</i>	<i>9%</i>	<i>n.d.</i>	<i>4%</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>5%</i>	<i>12%</i>

Tableau 4 : Flux métalliques annuels sur le bassin de la Seine à l'amont de Poses (moyenne 1994-2003) : incertitudes probablement supérieures à 20% (t/an). *n.d.* : valeur non disponible.

Les bilans de cadmium, mercure et plomb peuvent présenter des particularités par rapport à celui du zinc :

- les flux récents (1994-2003) majoritaires de cadmium, sur le bassin de la Seine résultent de l'utilisation d'engrais phosphatés (5,8 t/an), de la contamination des ordures ménagères et de sables de réseau mis en décharge (6,3 t/an), du rejet d'eaux usées domestiques traitées (3,1 t/an) et des retombées atmosphériques (3,2 t/an). La comparaison des apports directs des stations d'épuration et des industries (3,1 et 0,02 t/an) au différentiel du flux de cadmium naturel résultant de l'érosion des sols non contaminés (0,15 t/an) c'est-à-dire le bruit de fond* et arrivant à l'estuaire (2,2 t/an) fait apparaître un bilan quasiment équilibré si on prend en compte les dépôts en barrage-réservoir, plaines alluviales et surtout le dépôt à terre des matériaux de dragage (0,01, 0,03 et 0,17 t/an). Les mesures de cadmium sont toutefois souvent moins précises que celles du zinc ou du plomb : les concentrations de cadmium sont en effet très faibles, souvent en dessous des limites de quantification ;
- la tentative de bilan des flux de mercure sur le bassin de la Seine est encore plus incomplète, de nombreux flux n'étant pas encore renseignés. Les flux associés à la mise en décharge des ordures ménagères et sables de réseaux (5 t/an) sont bien supérieurs aux retombées atmosphériques (0,75 t/an) et aux augmentations observées entre l'amont (0,02 t/an) et l'estuaire (1,4 t/an), même en tenant compte des rétentions fluviales (0,004 + 0,013 + 0,040 = 0,057 t/an) ;

- le bilan de plomb est aussi bien renseigné que celui du zinc et présente des caractères communs. Le flux principal est celui résultant de la contamination des ordures ménagères et des sables de réseaux mis en décharge (1270 t/an), suivi par celui des retombées atmosphériques (205 t/an), des eaux usées domestiques avant (73 t/an) ou après traitement (38 t/an). Contrairement au cadmium, les apports récents de plomb associés à la valorisation agricole des boues de station d'épuration (15 t/an) sont bien supérieurs à ceux présents dans les engrais phosphatés (1,4 t/an), tout en étant bien inférieurs aux dépôts atmosphériques en milieu rural (100 t/an). Comme pour le zinc, la somme des apports directs issus des stations d'épuration (38 t/an) et des activités industrielles (1,1 t/an) est environ moitié de l'augmentation de flux entre le flux naturel issu de l'érosion des sols non contaminés (14 t/an) et celui apporté par la Seine à l'estuaire (96 t/an) même en tenant compte des stocks accumulés en réservoir, plaine alluviale et dans les matériaux de dragage (0,6 + 1,3 + 4,3 = 6,2 t/an). Il faut noter que ces flux annuels ont été établis pour la période 1994-2003 pendant laquelle l'usage de plomb dans l'essence a été réglementé puis interdit.

À l'issue de cette première tentative de bilan annuel des flux métalliques dans le bassin de la Seine, il semble donc nécessaire, pour boucler le bilan des métaux, non seulement de préciser et valider les estimations actuelles, surtout lorsqu'elles varient de façon significative, mais aussi d'invoquer les fuites non quantifiées des décharges urbaines et industrielles ou d'autres sources diffuses.

Imprécision des bilans : retombées atmosphériques et flux métalliques de la Seine à Poses

La grande diversité des informations collectées pour établir ces bilans annuels de flux métalliques sur le bassin de la Seine conduit à s'interroger sur l'exactitude ou sur la précision des valeurs rassemblées en les confrontant aux valeurs estimées par une voie différente et indépendante.

La **figure 15** compare les émissions atmosphériques industrielles, données provenant de sources administratives multiples, aux retombées atmosphériques mesurées, après correction des dépôts résultant de l'érosion éolienne.

L'accord entre les émissions et les dépôts atmosphériques est globalement satisfaisant, les dépôts étant moins de 10 fois supérieurs aux émissions recensées : si l'on tient compte de l'absence de tout contrôle qualité dans la plupart des déclarations industrielles d'émissions métalliques annuelles, cet écart semble compréhensible.

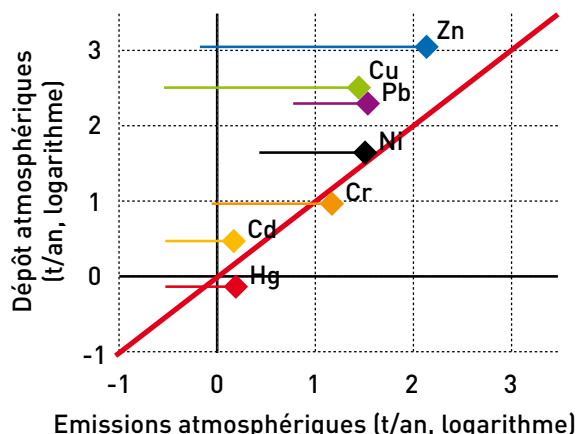


B. Mousses terrestres avec règle graduée.



Figure 15 : Collecte des retombées atmosphériques totales (A), échantillonnage de mousses terrestres (B) et comparaison (C) des flux annuels de dépôts atmosphériques mesurés et des émissions atmosphériques déclarées (CITEPA) (t/an en logarithmes décimaux) sur le bassin de la Seine. L'analyse des métaux dans les mousses terrestres (B) (100 stations sur le bassin) permet d'extrapoler les mesures de retombées (4 à 6 stations) (voir figure 2 page 13).

C.



Indépendamment des bilans annuels pour le bassin de la Seine, les sources de rejets métalliques de la Seine à Poses ont été estimées, pour la période 1994-2003 [figure 16], en tenant compte des :

- sources naturelles dues à l'érosion des sols : bruit de fond naturel* multiplié par le flux sédimentaire moyen de 700 000 t/an à Poses, augmenté de 10-20% pour prendre en compte les flux de métaux dissous ;
- sources urbaines et domestiques estimées par les suivis de qualité du milieu aquatique en 15 stations situées en amont et en aval de Paris, avec des densités d'habitation comprises entre 20 et 800 hab/km² : cette estimation des rejets urbains moyens annuels par habitant est multipliée par la population totale du bassin (14 millions d'habitants) ;
- sources industrielles répertoriées estimées à la fois par des déclarations obligatoires (Registre Français des Emissions Polluantes, IREP, 2004) et par l'extrapolation de mesures de flux moyens sur 24 h sur les sites industriels majeurs (AESN, 2006) ;
- flux en sortie du bassin : flux particuliers (teneur moyenne x 700 000 t/an) + dissous à Poses (10 à 20% en plus) + dépôts des dragages.

La somme des flux naturels (érosion des sols non contaminés), domestiques et industriels tels qu'ils ont pu être mesurés ou estimés, reste bien inférieure aux flux observés en sortie de bassin. L'écart est de 30 % pour le plomb mais peut atteindre 80% pour le mercure. Les rejets industriels, en particulier, sont faciles à sous-estimer. En effet, le nombre de données de contrôle accessibles est insuffisant. Les données d'auto-surveillance sont collectées par les Directions régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRES) : dans le cadre des travaux du PIREN-Seine, elles ont été rarement utilisées car elles sont éparpillées et souvent stockées sous différents formats et supports.

D'autre part, les seuls résultats de ces contrôles facilement accessibles car placés dans des banques de données à l'échelle du bassin, sont agrégés sous forme d'indicateurs globaux, utilisés pour le calcul de la redevance, comme le méttox*. Enfin les industries occasionnent souvent des rejets diffus qui ne sont pas pris en compte. Ces derniers proviennent de l'érosion de sols contaminés par des dépôts métalliques ou par des fuites de décharges mal contrôlées : un héritage de plus de 200 ans d'activités industrielles, qui mériterait pourtant d'être étudié avec soin.

Il en est de même des fuites non quantifiées résultant des rejets historiques d'eaux usées parisiennes depuis 1890 sur des terrains d'épandage et de culture sur une zone de 30 km² environ, à l'ouest de Paris où des teneurs très élevées (zinc, cadmium) sont toujours observées dans les sols.

Pourtant réalisées indépendamment, les analyses de flux de sortie à l'estuaire conduisent à la même conclusion : toutes les sources de pollution métalliques ne sont pas encore quantifiées. Comme évoqué précédemment, les efforts actuels des équipes du PIREN-Seine sont dirigés vers l'identification des sources de rejets métalliques en Seine et dans ses affluents, sources que la figure 16 permet globalement de quantifier pour cinq métaux.

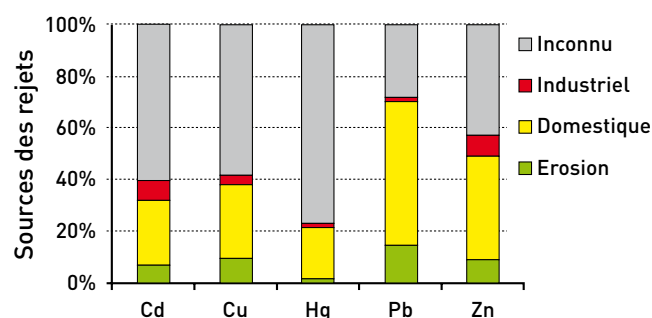


Figure 16 : Importance relative des principales sources d'apports métalliques du bassin de la Seine à son estuaire (Poses) permettant de quantifier les sources de pollution métallique qu'il faut encore identifier.



L'évolution à long terme de la contamination

Si la consommation de métaux du bassin de la Seine est estimée à 30% de la consommation nationale, la demande de chaque métal suit une évolution particulière. Celle-ci dépend à la fois des usages industriels et domestiques qui en sont faits ainsi que de la réglementation environnementale, laquelle est de plus en plus contraignante. Cette sévérité croissante doit beaucoup à la réglementation française sur les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) depuis les années 70 et à la transposition progressive des directives européennes en droit français.



Évolution des sources de contamination

Les principales évolutions constatées sont les suivantes :

- les demandes annuelles en cuivre, plomb et zinc (figure 17) ont doublé voir quadruplé entre 1950 et 2000 alors que la population française progressait de 30% et celle du bassin de 60%. L'utilisation par habitant de ces trois métaux a donc augmenté de 30 à plus de 200% selon les cas ;
- la croissance de la demande en cadmium est plus complexe. Si elle croît plus rapidement que pour le cuivre, le plomb et le zinc entre 1950 et 1960, elle atteint un maximum en 1995, avant de chuter très rapidement depuis ;
- la demande de mercure reste soutenue jusqu'en 1960. Elle chute par paliers vers 1975, puis vers 1995, pour atteindre aujourd'hui quelques pourcents seulement de sa valeur en 1950.

Pour comprendre ces évolutions, il est nécessaire de prendre en compte les principaux usages de chaque métal :

- le cas du mercure est nettement particulier. Les premières mesures de régulation de son usage datent des années 1970, suivies d'un autre train de mesures 20 ans plus tard (interdiction de la vente de thermomètres à mercure le 1er mars 1999, interdiction dans les piles et dans les matériaux automobiles, obligation de mettre en place des séparateurs d'amalgames sur les canalisations des dentistes à partir de 1998) : ces périodes correspondent aux deux paliers observés sur la figure 17. La diminution préalable de la demande de 1960 à 1975 s'explique probablement par une diminution de la demande des industriels, encore présents à cette époque sur le bassin de la Seine, pour leurs usines d'électrolyse à cathode de mercure : d'une part ils n'augmentent plus de manière significative le nombre de leurs cuves à mercure et, d'autre part, ils commencent alors à contrôler leurs pertes en mercure réduisant ainsi leur réapprovisionnement en ce métal onéreux ;

- dans les années 70, le cadmium était essentiellement utilisé sous forme de pigments (40%) pour la galvanoplastie (dépôt électrochimique, 20%) et la stabilisation du polychlorure de vinyle (PVC, 10%). A partir des années 90, il est entré dans le processus de fabrication des accumulateurs Ni/Cd qui a représenté jusqu'à 70 % de la consommation totale de cadmium. Depuis le milieu des années 90 cependant, l'usage du cadmium a été fortement restreint en particulier pour les accumulateurs. Sa consommation a été divisée par cinq entre 1995 et 2000 ;

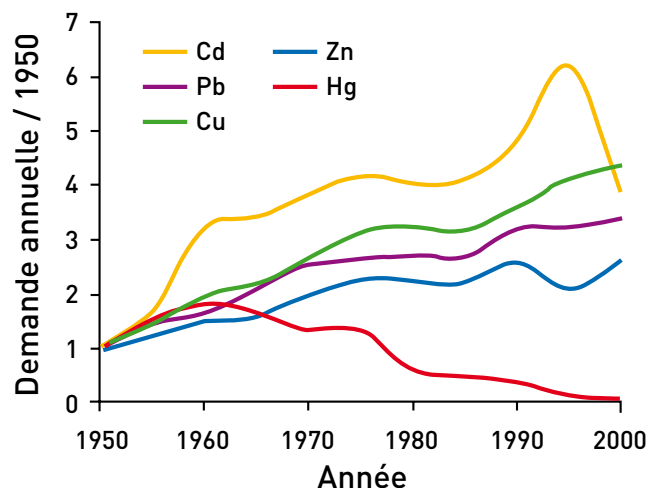


Figure 17 : Évolution relative de la demande annuelle française en métaux (demande actuelle/demande en 1950) pour le cadmium, cuivre, mercure, plomb et zinc.

- les usages du plomb ont également beaucoup varié. En 1950 ces usages étaient très diversifiés essentiellement sous la forme de plomb métal (câbles, tuyaux, batteries) les batteries étant très peu recyclées à cette époque. Dans les années 60, l'augmentation de la consommation d'essence induit une augmentation de l'usage de plomb tétraéthyle, utilisé comme additif aux carburants. Cet usage dispersif du plomb génère des fuites à 100% dans le milieu naturel : ces émissions sont d'abord effectuées dans l'atmosphère puis, par transfert atmosphérique et via les eaux de ruissellement, vers le compartiment sol. Donc, dans les deux cas, cet usage représente une source de plomb pour les eaux fluviales.

La quantité de plomb dans l'essence a été heureusement réduite en 1975, puis en 1991, avant que cet usage ne devienne complètement interdit en 2000. Le plomb est également utilisé sous forme d'oxydes dans le cristal ou en radioprotection à raison, par exemple, d'environ un kilogramme de plomb par tube cathodique de téléviseur. Cet usage s'est beaucoup développé des années 1970 à 2000 et est resté important jusqu'au développement des écrans à cristaux liquides (écrans plats). L'usage du plomb en joint de toiture est modéré et est redevenu équivalent à celui de 1950. Avec les nouvelles normes de plomb dans les eaux potables, les tuyaux de distribution en plomb sont également progressivement remplacés. En fait, les accumulateurs automobiles constituent aujourd'hui la part principale des usages du plomb puisqu'elle est passée de 10% en 1950 à 70% aujourd'hui.

Il est important de noter que ces chiffres sont ceux des demandes, c'est-à-dire qu'ils incluent des produits et matériaux qui seront recyclés. Le taux de recyclage peut être aujourd'hui très élevé. Il atteint 90% pour les accumulateurs et les verres de radioprotection.

En plus de l'évolution temporelle des usages, il faut prendre en compte leur évolution spatiale. En 1940, Paris et sa proche banlieue concentraient plus de la moitié des industries liées au plomb du bassin. Cette proportion n'est plus que de 30% en 2000. Parallèlement, le nombre de ces industries a chuté de moitié sur le bassin. Les industries du plomb ne sont donc plus concentrées sur l'agglomération parisienne mais dispersées sur tout le bassin. Cette restructuration industrielle, des ateliers aux industries lourdes, est liée à des innovations techniques (abandon des caractères d'imprimerie en plomb au profit de l'offset dans les années 70, développement des écrans à cristaux liquides, changement de types de batteries, évolution de l'industrie des piles, modification des procédés de traitement de surface...), ainsi qu'aux pressions foncières ayant conduit à un éloignement des ateliers placés initialement dans Paris ou dans la petite couronne. Cette restructuration est observée pour l'ensemble des métaux. Elle compte au moins autant que les mesures réglementaires dans l'évolution des rejets de métaux dans la Seine.

La contamination du milieu aquatique archivée dans les sédiments

L'examen des sédiments alluviaux, prélevés sous forme de carottes* de près d'un mètre prises près de Poses [Bouafles : voir figure 2, page 13] permet de reconstituer la chronique de la contamination par les métaux de l'ensemble du bassin depuis 1935, date du fond des carottes. Ce site est en effet situé à l'entrée de l'estuaire, sur un bras mort de la Seine que les crues hivernales recouvrent régulièrement (figure 18). Il reçoit les eaux de Méga Paris* et de la confluence de l'Oise.

Les facteurs d'enrichissement (EF*) de chaque métal, par rapport au bruit de fond naturel*, ont été calculés, par tranche de 5 ans, de 1935 jusqu'à 2000. Les facteurs d'enrichissement (EF, figure 19 page 44) présentent des trajectoires spécifiques pour chaque métal. Alors que la demande en métaux croissait régulièrement de 1950 à 2000 (figure 17, page 41), les facteurs d'enrichissement diminuaient au contraire régulièrement depuis 1935 pour l'arsenic et le cobalt,

depuis 1960-1965 pour le plomb et le zinc, depuis 1965 pour le cadmium et 1970 pour le chrome. Il n'y a donc pas de synchronisme ni de relation directe entre l'évolution de la consommation et celle de la décontamination : les matériaux solides, déchets et sols accumulant ces métaux ne conduisent pas immédiatement à des fuites significatives proportionnelles à l'importance des stocks. Ce stockage plus ou moins bien connu et contrôlé constitue donc une menace importante pour l'avenir du bassin de la Seine.

Toutefois la comparaison ne doit pas s'arrêter là, car les facteurs d'enrichissement maximaux observés dans les années 1950 et 1960 sont très différents pour les métaux : 1,8 pour le cobalt, 4 pour l'arsenic, 7 pour le chrome, 22 pour le plomb et le zinc, enfin près de 140 pour le cadmium et 420 pour le mercure, non présenté ici.

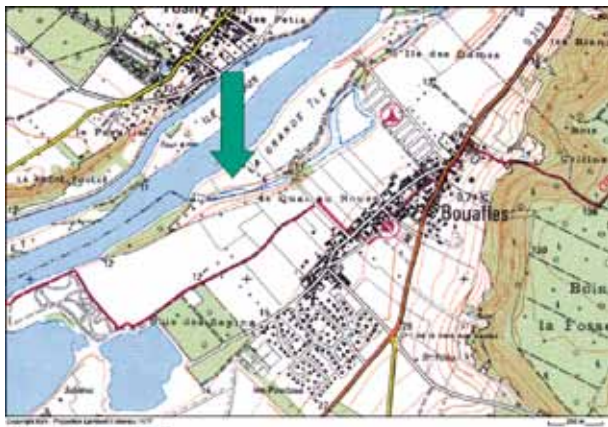


Figure 18 : Site et mode de collecte de carottes de sédiments alluviaux à Bouafles.



Ces facteurs d'enrichissement en Pb, Zn, Cd et Hg sont parmi les plus élevés de tous les fleuves de taille semblable. Ils résultent de deux facteurs :

- la pression humaine urbaine et industrielle dans ce bassin a été très élevée, analogue à d'autres grandes régions industrielles européennes comme les vallées de la Sarre, Ruhr, Meuse et Escaut ;
- la dilution par les particules fluviales issues de l'érosion du bassin versant est ici très faible ($10 \text{ t/km}^2/\text{an}$) soit plus de dix fois plus faible que la moyenne mondiale.

Dans l'estuaire, la chronique de la contamination peut être différente en raison des rejets directs, surtout industriels. C'est le cas du cadmium qui présente un pic en 1980. Cette contamination supplémentaire, d'origine industrielle, liée à la production d'engrais phosphatés a duré une dizaine d'années (1985-1995) et a été bien suivie par l'évolution des teneurs métalliques dans la moule (*Mytilus edulis*) surveillée dans la baie de Seine ouest à Villerville par l'Ifremer depuis 1979, dans le cadre du Réseau National d'Observation (RNO) du littoral, géré par l'Ifremer.

Si l'évolution de la contamination de l'ensemble du bassin peut être archivée dans l'analyse d'une seule carotte de sédiment alluvionnaire bien choisie, les réponses sociétales à la contamination métallique sont multiples (réglementation environnementale, surveillance du milieu, études scientifiques) et ont dû faire l'objet d'analyses multiples conduisant aux constats suivants :

- avant 1970, date de la première analyse de mercure dans l'eau brute de la Seine et de l'Oise par le CRECEP (laboratoire d'analyse des eaux de la Ville de Paris), on ne disposait d'aucune information sur l'état de la contamination métallique du milieu : cette lacune peut s'expliquer par la pauvreté de l'arsenal analytique. La technique de l'absorption atomique, aujourd'hui couramment utilisée, commençait juste à se développer. C'est aussi seulement à cette époque que les ravages extrêmes des pollutions par le mercure (maladie de Minamata) et le cadmium (maladie d'Itai-Itai) ont commencé à être connus des spécialistes ;
- jusqu'en 1970, la prise de conscience de ces risques sur la Seine, comme sur les autres fleuves très pollués, a donc été quasiment impossible alors que l'état du milieu était très dégradé et que les impacts sanitaires et écologiques devaient être à leur maximum, particulièrement dans l'estuaire et la baie de Seine, du fait de la consommation humaine de mollusques et de poissons ;
- de 1970 à 1983 plusieurs études préliminaires ont été réalisées sur les métaux les plus toxiques (Cd, Cu, Hg, Pb et Zn) grâce au développement de l'absorption atomique ;
- puis, en 1983, le premier réseau de surveillance sur les sédiments et les matières en suspension (à Poses seulement pour celles-ci) a été mis en place par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie ; il a été complété et modifié depuis afin de pouvoir mettre en application la Directive Cadre européenne sur l'Eau ;

- les efforts de régulation de la pollution industrielle des eaux ont commencé dans les années 1950, avec le renforcement du classement d'industries par le risque qu'elles représentent pour le milieu aquatique ; ces efforts se sont poursuivis lors de la mise en place des commissions de bassin dans les années 1960, puis lors de la réforme de la loi concernant les installations classées du 19 juillet 1976 ;
- la mise en place d'un programme de contrôle des rejets toxiques en 1981 par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie correspond à une action incitative très importante sur les industries de traitement de surface, basée de 1981 à 1991, sur les « matières inhibitrices » (MI), puis sur le métox* et les MI à partir de 1992 ;
- l'effort de recherche mené par les scientifiques est encore plus tardif : il est surtout lié aux publications du PIREN-Seine et au programme Seine-Aval en ce qui concerne la partie estuarienne.

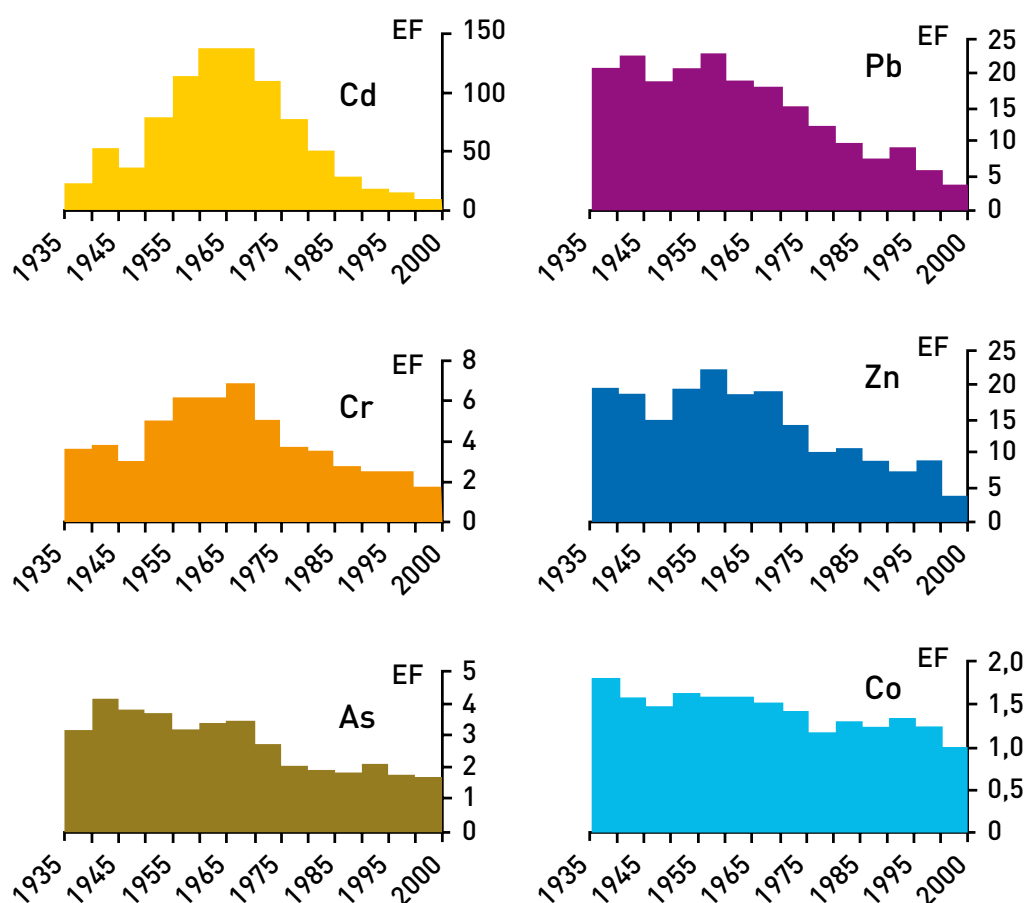


Figure 19 : Évolution des facteurs d'enrichissement (EF*) en métaux particuliers dans les carottes prises dans la plaine alluviale à Bouafles (EF = 1 pour les niveaux de référence non contaminés de 1935 à 2000).

Une décontamination régulière depuis 1979

Bien que la surveillance institutionnelle de la contamination de la Seine par les métaux ne débute qu'en 1983 (1979 pour les moules dans l'estuaire), on a pu reconstituer celle-ci, de l'amont à l'aval du bassin, en analysant plusieurs types de sédiments récents.

Ainsi des carottes* de sédiments prélevés dans les Grands Lacs de Seine, à l'amont de Méga Paris*, ont révélé une contamination très limitée et une décroissance légère entre 1980 et 2000.

Les sédiments dragués en Seine pour maintenir la navigation, régulièrement analysés depuis une quinzaine d'années à l'amont et à l'aval de Paris, montrent aussi une décontamination mais on y trouve parfois des sédiments plus anciens, de quelques dizaines d'années, donc très contaminés.

Comme l'illustre clairement la [figure 19](#), les sédiments prélevés dans le bras mort de Bouafles, représentatifs de la Seine à Poses, sont de moins en moins contaminés en métaux depuis les années 70.

La station de Poses suivie régulièrement depuis 1983, présente également une décroissance d'un facteur dix de la contamination des matières en suspension sur cette période pour le cadmium et d'un facteur cinq environ pour le cuivre, le mercure, le plomb et le zinc. Bien que depuis une dizaine d'années cette décroissance se soit ralentie, le bassin de la Seine, à partir des années 70, présente donc, à l'aval de la confluence avec l'Oise, une remarquable décontamination.

En milieu estuarien, la contamination générale à long terme peut être appréciée par l'analyse de moules recueillies depuis 1979 à Villerville en baie de Seine dans le cadre du Réseau National d'Observation (RNO) du littoral, géré par l'Ifremer. Un pic important de contamination en cadmium ($EF^* = 12$) est repérable pour la période 1985-1995 : ce pic, lié aux apports directs à l'estuaire, n'apparaît donc pas dans les apports à Poses.

D'autres évolutions confirment la chute généralisée de teneurs en métaux sur le bassin. Les boues de la station d'épuration Seine-Aval, analysées depuis 1979 en raison de leur valorisation en agriculture, présentent une décontamination très marquée, de l'ordre d'un facteur 10. Cette décontamination

présente un épisode encore plus marqué en 1994-95 du fait de la dilution des eaux résiduaires urbaines par les argiles non contaminées utilisées pour la construction du métro Météor, avant d'être rejetées dans le réseau d'assainissement domestique (zone bleue de la [figure 20](#) page 46). En 1979 les teneurs en métaux toxiques dans les boues étaient très fortes par rapport au bruit de fond* des sédiments de la Seine (facteurs d'enrichissement égaux à 800, 300, 130, 90, 70 et 20 pour Cd, Hg, Zn, Cu, Pb, et Ni, respectivement). De tels niveaux de contamination en mercure, plomb et zinc dans les boues issues des traitements des eaux résiduaires urbaines étaient, à l'époque, aussi mesurés dans d'autres pays européens ou à Los Angeles. La contamination en cadmium et en mercure des effluents à cette époque était exceptionnellement élevée, en raison essentiellement des industries de traitement de surface.

Il faut rappeler ici que la contamination des boues produites par une station d'épuration est une excellente illustration de la contamination des particules rejetées avec l'eau épurée. Depuis 1979, les teneurs de l'ensemble des métaux dans les boues produites par la station d'épuration Seine-Aval ont présenté une décroissance exponentielle (linéaire sur la [figure 20](#) où les logarithmes des teneurs sont reportés).

À l'époque du maximum de contamination du bassin les premières normes de valorisation agricole étaient beaucoup moins sévères qu'aujourd'hui, ce qui met en évidence la méconnaissance, à cette époque, des effets toxiques à de tels niveaux (lacune de connaissance scientifique) et/ou la sous-estimation des risques (lacune de prise de conscience de la société). Le fonds géochimique (Cd, Hg) était aussi très surestimé par les scientifiques, ce qui conduisait à une sous-estimation des risques.

Depuis trente ans, les normes d'utilisation des boues d'épuration des eaux se sont, en France, considérablement durcies, pour être en conformité avec les réglementations européennes. Elles ont par exemple été divisées par dix pour le cadmium. Ainsi, malgré leur contamination très élevée par rapport au bruit de fond géochimique du bassin, les boues de stations d'épuration ont généralement satisfait les normes européennes et/ou françaises : cet accord a été particulièrement respecté pour le nickel. Par contre, pour le cadmium et le zinc, les boues de la station

d'épuration de Seine-Aval, non mélangées à d'autres particules moins contaminées, pouvaient être avant 1983 à la limite des normes en vigueur. L'évolution de la réglementation environnementale sur les métaux dans les rejets d'eau résiduaire après traitement a accompagné la décroissance de la contamination des boues issues de ce traitement.

Sans pouvoir actuellement nous prononcer sur l'existence d'impacts sanitaires passés, présents ou futurs de ces rejets, nous pouvons toutefois comparer la contamination métallique des particules rejetées en Seine au bruit de fond géochimique et, à l'aide du facteur d'enrichissement EF, affirmer que leur contamination reste significative pour certains métaux.

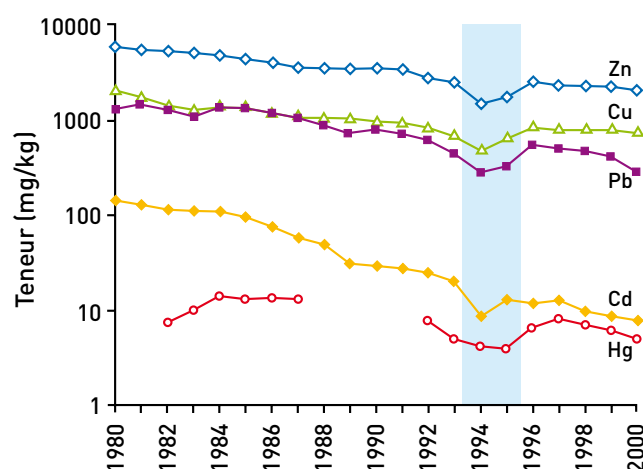


Figure 20 : Décroissance exponentielle des teneurs métalliques (mg/kg en échelle logarithmique) dans les boues produites par la station d'épuration de Seine-Aval de 1979 à 2000 (données SIAAP).

Pollution de la Seine par rapport aux autres fleuves

Il n'existe pas encore de base de données fiable sur la contamination métallique des fleuves européens car elle dépend de la station, du type d'échantillon* considéré et du type d'analyse effectué, par exemple sur les concentrations dissoutes labiles* ou non labiles. Nous comparons ici d'une part les concentrations dissoutes totales (après filtration à 0,45 µm) et d'autre part les teneurs des sédiments collectés, sous forme de carotte*, à l'aval des bassins (archives sédimentaires).

Les moyennes des concentrations en métaux dissous relevées en Marne (station de Saint-Maurice) et en Seine (station d'Andrésey) (tableau 5) sont comparées à des mesures réalisées dans d'autres rivières carbonatées européennes :

- les concentrations en nickel et en cuivre dissous sont très supérieures à celles relevées dans la Krka (Croatie), fleuve de montagne très peu pollué, et sont du même niveau que les concentrations les plus élevées mesurées dans le Rhône et la Tamise ;
- les concentrations en cobalt dissous sont du même ordre de grandeur que celles de la Tamise.

Rivière	Marne				Seine					Rhône	Tamise	Krka
	[1998]	Saint Maurice (2004)			[1998]	[1999]	Andrésy (2004)			[1986 & 1991]	[2000]	[1991]
	Gamme	Moy.	Gamme	% labile	Gamme	Gamme	Moy.	Gamme	% labile	Valeurs ponc-tuelles	Valeurs ponc-tuelles	Valeurs ponc-tuelles
Ni		1080	40-2110	52%			1694	338-3760	42%	460	840	42
Co		300	113-625	20%			366	144-1039	29%	66	600	
Cu	1100-1700	1700	700-2900	25%	1100-2700	1300-2500	2200	500-3000	25%	2200	4300	200-600
Cd	7-19	23	12-44	37%		11-67	37	8-111	29%	33		

Tableau 5 : Concentrations en nickel, cobalt, cuivre et cadmium dissous totaux (ng/l) dans le bassin de la Seine (rivières Marne et Seine), comparées aux concentrations d'autres rivières européennes carbonatées (Rhône, Tamise et Krka en Croatie). La fraction moyenne labile* est exprimée en pourcentage, correspondant à une valeur moyenne de carbone organique dissous de 2,4 et 4,2 mgC/l en Seine-et-Marne.

La comparaison des archives sédimentaires du Rhin, de la Volga et de l'Escaut (Scheldt) avec celles de la Seine sur 60 ans permet de mettre ces évolutions en perspective (figure 21) :

- l'évolution n'est pas continue pour les bassins les plus contaminés (Rhin, Escaut et Seine) ;
- les sédiments du delta de la Volga ne présentent pas de contamination, sans doute en raison de la très forte rétention des matières en suspension contaminées dans la cascade de réservoirs de ce fleuve (effet de filtre) ;
- après 1950, la Seine se décontamine plus tard que le Rhin, mais avant l'Escaut ;
- en 1900, sur le Rhin, les niveaux de plomb et de zinc présentent déjà des contaminations importantes, plus élevées même pour le plomb en 1900 qu'en 1980 ;
- pour le Rhin, l'Escaut et la Seine, la décontamination récente est effective.

Il est donc certain que les pressions anthropiques (mines, industries) ont été suivies d'impacts environnementaux bien plus forts il y a 60 ou 100 ans qu'aujourd'hui : les niveaux de référence pré-anthropiques en métaux devront donc être cherchés avant l'ère industrielle ou sur des sites actuels soumis à des pressions humaines minimales (petits bassins non peuplés).

Enfin l'histoire des relations Homme - rivière s'inscrit bien dans les archives fluviales, chaque fleuve ayant son évolution propre qu'il appartient maintenant de déchiffrer.

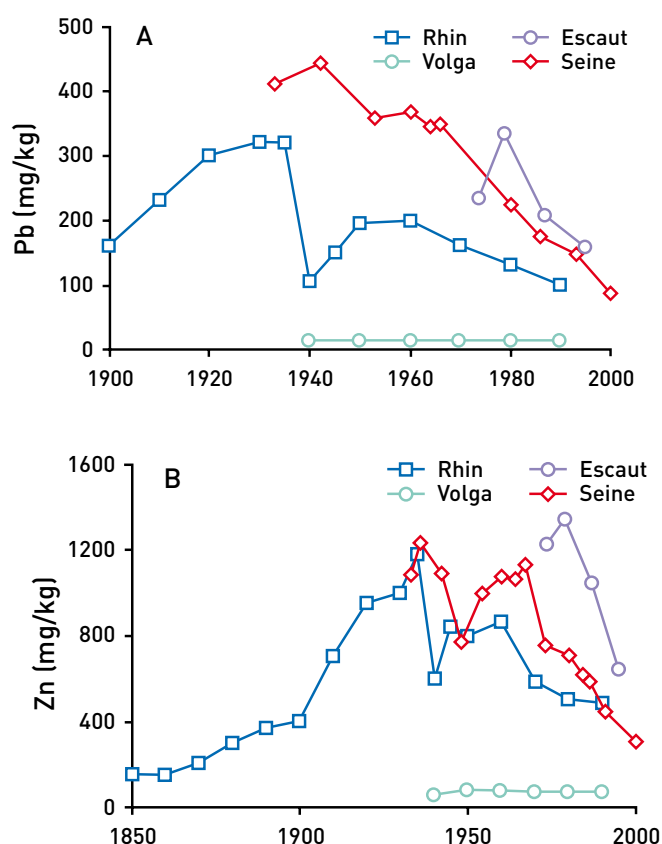


Figure 21 : Évolution comparée de 1900 à 2000 des teneurs en (A) plomb et (B) zinc particulaire dans la Seine, le Rhin, l'Escaut et la Volga : analyses sur carottes de sédiments.



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

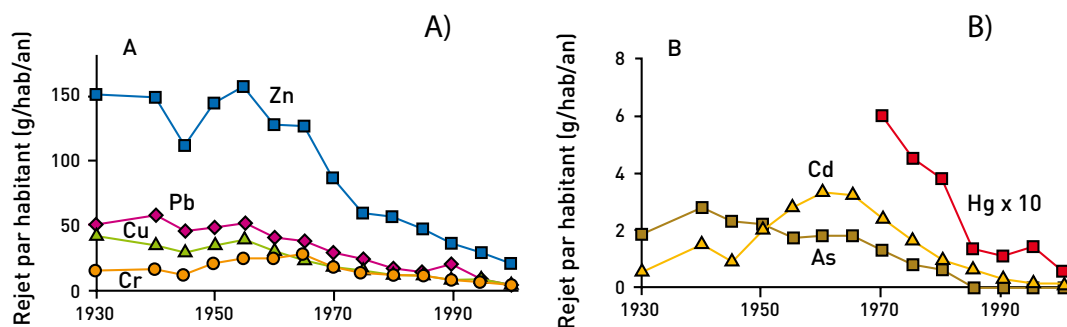


Figure 22 : Évolution comparée de l'estimation des rejets annuels dans le bassin de la Seine, en gramme par habitant et par an : (A) cuivre, chrome, plomb et zinc, (B) arsenic, cadmium et mercure. (échelle multipliée par 10 pour le mercure).

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 : • 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

Pour en savoir plus sur les travaux des auteurs

CDHTE, <http://cdhte.cnam.fr>

CEMAGREF, <http://www.cemagref.fr/Informations/DossiersThematiques/QualiteEauVieAquatique/Enjeu.htm>

CEREVE, <http://www.enpc.fr/cereve/>

IFREMER, <http://www.ifremer.fr/delapc/>

PIREN-Seine, <http://www.piren-seine.fr/>

SEINE-AVAL, <http://seine-aval.crihan.fr/>

bibliographie

- Azimi S, Cambier P, Lécuyer I, Thévenot DR. (2004) Heavy metal determination in atmospheric deposition and other fluxes in Northern France agrosystems. *Water Air Soil Pollut*, 157: 295-313.
- Buzier R, Tusseau-Vuillemin M-H, Martin C, Rousselot O, Mouchel J-M. (2006) Trace metal speciation and fluxes within major French wastewater treatment plant: impact of the successive treatment stages. *Chemosphere*, 65(11): 2419-26.
- Chiffolleau J-F, Claisse D, Cossa D, Ficht A, Gonzalez J-L, Guyot T, Michel P, Miramand P, Oger C, Petit F. (2001). La contamination métallique. Programme scientifique « Seine Aval ». Fascicule n°8. Éditions IFREMER. Plouzané (France). 39 p.
- Elbaz-Poulitchet F, Seidel J-L, Casiot C, Tusseau-Vuillemin M-H. (2006) Short-term variability of dissolved trace element concentrations in the Marne and Seine Rivers near Paris, *Sci Total Environ*, 367(1) 278-287.
- Garnaud S, Mouchel J-M, Chebbo G, Thévenot D-R. (1999) Heavy metal concentrations in dry and wet atmospheric deposits in Paris district : comparison with urban runoff. *Sci Total Environ*, 235: 235- 245.
- Gonzalez J-L, Thouvenin B, Chiffolleau J-F, Miramand P. (1999) Le cadmium : comportement d'un contaminant métallique en estuaire. Programme Scientifique « Seine Aval ». Fascicule n°10. Éditions IFREMER. Plouzané (France). 31 p.
- Gonzalez J-L, Thouvenin B, Dange C, Fiandrino A, Chiffolleau J-F. (2001) Modeling of Cd speciation and dynamics in the Seine estuary (France). *Estuaries*, 24(6B):1041-1055.
- Gonzalez J-L, Thouvenin B, Dange C, Chiffolleau J-F, Boutier B. (2006) The Role of Particle Sorption Properties in the Behavior and Speciation of Trace Metals in Macrotidal Estuaries: the Cadmium Example. In «The Handbook of Environmental Chemistry Series», Vol. 5: Water Pollution, Part H (Estuaries), Wangersky P.J. (Ed.), Springer.
- Gromaire M-C, Chebbo G, Constant A. (2002) Impact of zinc roofing on urban runoff pollutant loads: the case of Paris. *Water Sci Technol*, 45(7):113-122.
- Grosbois C, Meybeck M, Horowitz A, Ficht A. (2006) The spatial and temporal trends of Cd, Cu, Hg, Pb and Zn in Seine River floodplain deposits (1994–2000). *Sci Total Environ*, 356: 22-37.
- Horowitz AJ, Meybeck M, Idlafkih Z, Biger E. (1999) Variations in trace element geochemistry in the Seine River Basin based on floodplain deposits and bed sediments. *Hydrol Process*, 13: 1329–1340.
- Lestel L., Meybeck M., Thévenot D-R. (2007) Metal contamination budget at the river basin scale: an original Flux-Flow Analysis (F2A) for the Seine River, *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 11: 1771-1781.
- Meybeck M, de Marsily G, Fustec E. (1998) La Seine en son bassin, Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé. Elsevier, Paris, ISBN 2-84299-058-7, 749 p.
- Meybeck M, Horowitz A, Grosbois C. (2004) The geochemistry of the Seine River Basin particulate matter: distribution patterns of an integrated metal pollution index. *Sci Total Environ*, 328: 219–236.
- Meybeck M, Lestel L, Bonté P, Moilleron R, Colin J-L, Rousselot O, Thomas W, de Pontevès C, Grosbois C, Thévenot D-R. (2007) Historical perspective of heavy metals (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) in the Seine river basin (France). *Sci. Total Environ*, 375(1-3): 204-231.
- Moilleron R, Perez J, Garnaud S. (2005) Grain size distribution of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in silt trap sediments from the combined sewer network of Paris (France). *Water Sci Technol*, 52(3): 111-118.
- Thévenot DR, Moilleron R, Lestel L, Gromaire M-C, Rocher V, Cambier P, Bonté P, Colin J-L, de Pontevès C, Meybeck M. (2007) Critical budget of metal sources and pathways in the Seine river basin (1994-2003) for Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn, *Sci Total Environ*, 375(1-3): 180-203.
- Tusseau-Vuillemin M-H, Gilbin R, Taillefert M. (2003) A dynamical model to characterize the labile complexes collected with DGT devices. *Environmental Science and Technology*. 37 (8): 1645- 1652.
- Tusseau-Vuillemin M-H, Gilbin R, Bakkaus E, Garric J. (2004) Performance of diffusion gradient in thin films to evaluate the toxic fraction of copper to *Daphnia magna*, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 23(9): 2154-2161.
- Tusseau-Vuillemin M-H, Gourlay C, Lorgeoux C, Mouchel J-M, Buzier R, Gilbin R, Elbaz-Poulitchet F. (2007) Dissolved and bioavailable contaminants in the Seine river basin, *Sci Total Envir*, 375(1- 3): 244-256.

Glossaire

Agent complexant : entité moléculaire ionique ou neutre s'associant à une autre entité moléculaire, ici un élément métallique pour former un complexe*.

Anthropocène : nouveau temps géologique où l'action de l'Homme devient prépondérante sur les facteurs de contrôle naturels du milieu (Paul Crutzen, prix Nobel de chimie, 1995).

Anthroposystème : ensemble des usages, flux et stocks de matériaux, comme les métaux et les produits les contenant, et des interactions entre acteurs économiques, sociaux et politiques qui les génèrent et les contrôlent.

Bruit de fond naturel : concentration métallique dans la fraction dissoute* (Tableau 3) ou teneur métallique des matières en suspension* ou des sédiments* dans les sites de référence non influencés par les activités humaines (Tableau 2).

Carotte : échantillon* de sédiments prélevé avec un tube, dans les réservoirs ou dans les bras morts des rivières, afin de servir d'archives de la contamination du bassin.

Complexe : entité moléculaire résultant de l'association d'un élément métallique avec une entité ionique ou neutre ; dans le cas où la liaison se fait entre un atome central unique (le métal) et deux ou plusieurs fonctions distinctes de cette même entité chimique, on utilise le terme chélate (cas du cuivre cationique associé à l'éthylène diamine tétraacétate - EDTA).

DGT : voir gradient de diffusion en couche mince.

Diffusion : transport spontané d'une espèce chimique vers un milieu où elle est plus faiblement concentrée.

Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) : directive européenne 2000/60/CE, publiée en décembre 2000, établissant un cadre pour l'action communautaire dans le domaine de la gestion de l'eau (<http://europa.eu/scadplus/leg/fr/lvb/l28002b.htm>).

Dissous : voir fraction dissoute.

Échantillon : quantité d'eau, de matières en suspension*, de sédiments*, d'organismes pélagiques* ou benthiques* prélevés dans le milieu aquatique pour en déterminer sa contamination, ici par les métaux.

EF : facteur d'enrichissement d'un élément métallique fixé sur les particules d'un site donné en rapportant la teneur en ce site à celle d'un site de référence non influencé par les activités humaines $EF = \frac{(\text{métal})_{\text{échantillon}}}{(\text{métal})_{\text{bruit de fond}}}$

Estuaires macrotidaux : estuaires dans lesquels l'amplitude des marées est supérieure à 4 m.

Fraction biodisponible : fraction d'un échantillon* constituée des formes métalliques susceptibles d'agir sur les organismes vivants (plantes, animaux et hommes) ; si certaines fractions particulières peuvent être assimilées par des organismes aquatiques (par exemple les invertébrés benthiques*), les fractions dissoutes* sont généralement les plus toxiques et donc participent majoritairement aux fractions biodisponibles.

Fraction dissoute : fraction d'un échantillon* d'eau traversant un filtre de 0,45 µm de diamètre de pores.

Fraction labile : partie de la fraction dissoute* constituée des formes métalliques cationiques (ion libre) ou faiblement liées à des ions minéraux ou des molécules organiques.

Gradient de diffusion en couche mince – Diffusive Gradient in Thin Film (DGT) : dispositif d'échantillonnage des formes métalliques dissoutes* labiles*.

Labile : voir fraction labile.

Laisses de crue : particules déposées sur les berges d'une rivière lors de sa décrue.

Matières en suspension (MES) : particules présentes dans la colonne d'eau du fait de l'érosion, des rejets ou des remises en suspension des sédiments par la navigation ou les crues.

Méga Paris : agglomération parisienne comprenant Paris intra muros et les 415 villes environnantes dont les agglomérations sont distantes de moins de 200 m les unes des autres.

Métal libre : forme cationique, non complexée, d'un élément métallique généralement considérée comme représentative de sa toxicité.

Métox : somme pondérée des masses d'arsenic, cadmium, cuivre, chrome, mercure, nickel, plomb et zinc, auxquels sont attribués des poids différents en fonction de leur toxicité supposée (1 pour Cr et Zn ; 5 pour Cu et Ni ; 10 pour As, Cd et Pb ; 50 pour Hg). Le métox est un paramètre à vocation financière créé par les Agences de l'Eau (décret 75-996 du 28 octobre 1975 modifié par arrêté du 10 décembre 1991 sur les redevances liées à la qualité des eaux).

MPI : indice de pollution multi métallique calculé à partir de la moyenne des facteurs d'enrichissement (EF*) en Cd, Cu, Hg, Pb et Zn. Le poids du mercure dans le MPI a été volontairement réduit d'un facteur 8, par comparaison aux autres métaux, pour ne pas générer des contaminations extrêmes et pour pouvoir visualiser les contaminations des autres métaux. À une station donnée, le bruit de fond* des métaux peut varier suivant le type de minéraux des sédiments*. L'indice de pollution multi métallique en milieu non contaminé est inférieur à 1,5 ; il peut atteindre 100 dans les effluents urbains.

NQE : norme de qualité environnementale applicable aux eaux de surface par la Commission Européenne (<http://europa.eu/scadplus/leg/fr/lvb/l28180.htm>) dont les valeurs sont fixées dans la directive « fille » du 17 juin 2008.

Organismes benthiques : organismes aquatiques vivant à proximité du fond de la rivière ou de la mer.

Organismes pélagiques : ensemble des organismes aquatiques occupant la colonne d'eau de la rivière ou de la mer.

pH : mesure de l'acidité ou de la basicité d'une solution en utilisant l'activité de l'ion hydron H^+ .

Potentiel d'oxydo-réduction : grandeur, exprimée en volt (V), permettant de quantifier d'état d'oxydation ou de réduction d'une solution.

Remédiation : traitement chimique ou biologique, par exemple par des plantes (phyto-remédiation) permettant de stabiliser ou d'extraire d'un sol contaminé les polluants qui s'y trouvent, en diminuant ainsi leur toxicité.

Salinité : masse de sels dissous par kilogramme de solution, généralement exprimée en pour mille (‰) ; exemple : la mer est salée à 35‰.

Saturnisme : maladie due au plomb (en référence à la planète Saturne symbolisant le plomb pour les alchimistes).

Sédiments : particules déposées naturellement au fond des rivières.

Spéciation : caractérisation des formes chimiques sous lesquelles se trouve un élément dissous ou particulaire dans un échantillon* (figure 8, page 25).

Substances prioritaires (2455/2001/CE) : composés minéraux et organiques faisant l'objet d'une surveillance particulière et d'obligations de réduction des rejets, du fait de leur impact écotoxicologique (<http://europa.eu/scadplus/leg/fr/lvb/l28108.htm>) ; cette liste complète ainsi la Directive Cadre sur l'Eau et devient son annexe 10.

Taux de fuite du bassin : sorties totales de métaux moins sorties naturelles (érosion des sols non contaminés) divisées par la demande totale en métaux sur le bassin.



**eau
seine**
NORMANDIE

L'Agence de l'eau Seine-Normandie

est un établissement public du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. Sa mission est de financer les ouvrages et les actions qui contribuent à préserver les ressources en eau et lutter contre les pollutions, en respectant le développement des activités économiques. Pour ce faire, elle perçoit des redevances auprès de l'ensemble des usagers qu'elle redistribue sous forme d'aides financières aux collectivités locales, aux industriels, aux artisans, aux agriculteurs et aux associations qui entreprennent des actions de protection du milieu naturel. Ses actions s'expriment à travers un programme pluriannuel. Les études et recherches pilotées par l'Agence contribuent à la gestion équilibrée de la ressource en eau et de tous les milieux aquatiques.

Siège

51, rue Salvador Allende
92027 Nanterre Cedex
Tél. 01 41 20 16 00
Fax 01 41 20 16 09

www.eau-seine-normandie.fr

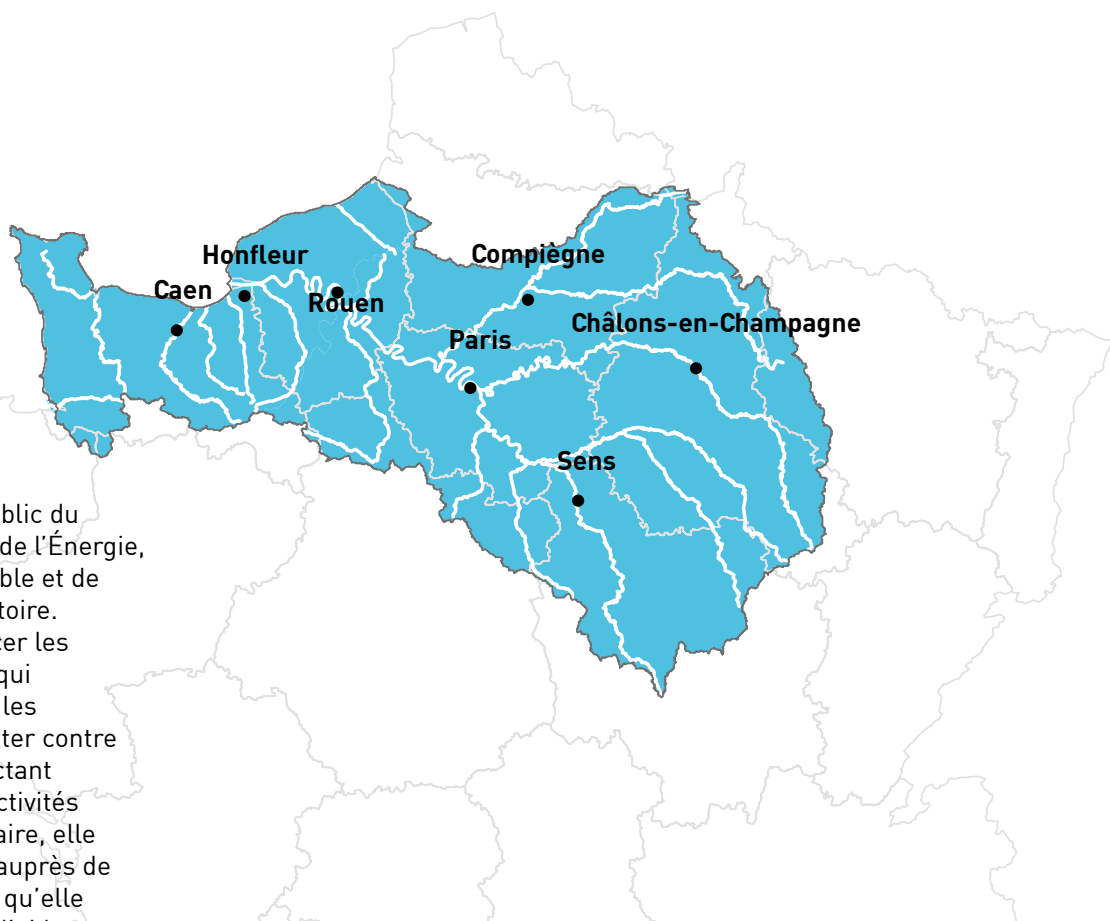
Programme PIREN-Seine

Direction et secrétariat :
UMR CNRS 7619 Sisyphe
Université Pierre et Marie Curie (Paris VI)
4, place Jussieu 75005 Paris
Tél. 01 44 27 74 24
Fax 01 44 27 45 88

www.piren-seine.fr

**ENSEMBLE
DONNONS
VIE À L'EAU**

Agence de l'eau



Les PARTENAIRES du PIREN-Seine

AGENCE DE L'EAU SEINE-
NORMANDIE (AESN)

www.eau-seine-normandie.fr

CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS)

www.cnrs.fr

DIRECTION RÉGIONALE DE
L'ENVIRONNEMENT
(DIREN ÎLE-DE-FRANCE)

www.ile-de-france.ecologie.gouv.fr

EAU DE PARIS

www.eaudeparis.fr

INTERNATIONAL ZINC ASSOCIATION
(IZA)

www.iza.com

LYONNAISE DES EAUX

www.lyonnaise-des-eaux.fr

LES GRANDS LACS DE SEINE :
INSTITUTION INTERDÉPARTEMENTALE
DES BARRAGES-RÉSERVOIRS DU
BASSIN DE LA SEINE (IIBRBS)

www.iibrbs.fr

SYNDICAT DES EAUX
D'ÎLE-DE-FRANCE (SEDIF)

www.sedif.com

SYNDICAT INTERDÉPARTEMENTAL
POUR L'ASSAINISSEMENT DE
L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE
(SIAAP)

www.siaap.fr

UNION NATIONALE DES PRODUCTEURS
DE GRANULATS (UNPG)

www.unicem.fr

VOIES NAVIGABLES DE FRANCE
(VNF)

www.vnf.fr



Programme PIREN-Seine

Numéro ISBN : 978-2-918251-06-4

Numéro ISSN : 1968-5734

Dépôt légal : juin 2009