



L' évolution de la contamination à long terme

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 ;

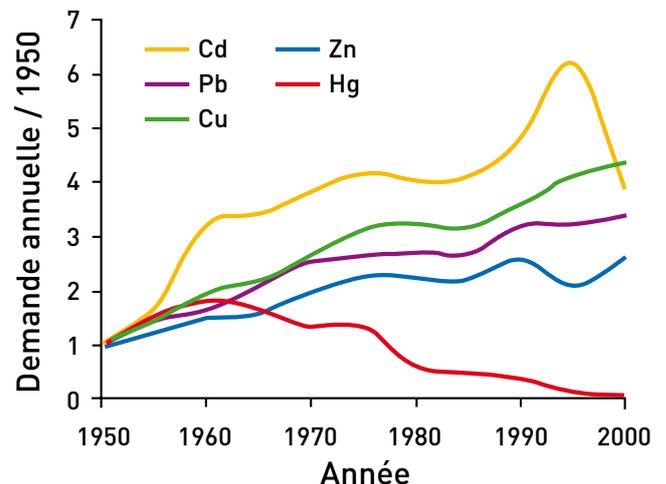


Figure 17 : Évolution relative de la demande annuelle française en métaux (demande actuelle/demande en 1950) pour le cadmium, cuivre, mercure, plomb et zinc.

- 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 t/km²/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 ;

ANALYSER

- 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.

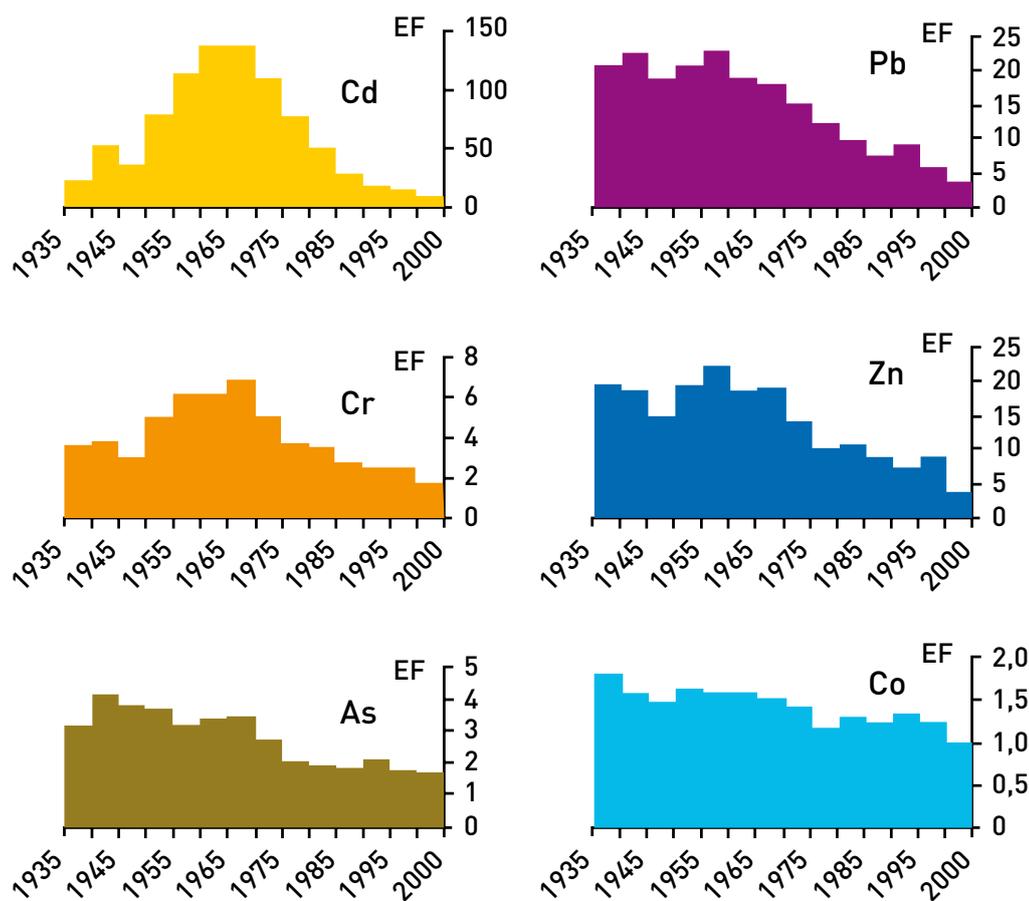


Figure 19 : Évolution des facteurs d'enrichissement (EF*) en métaux particuliers dans les carottes prises dans la plaine alluviale à Bouafles (EF = 1 pour les niveaux de référence non contaminés de 1935 à 2000).

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.

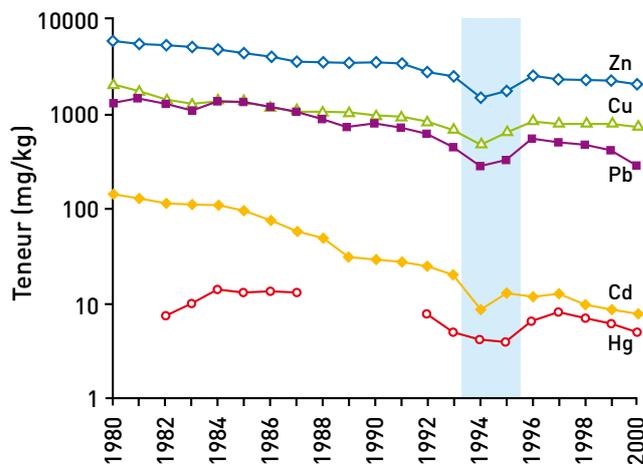


Figure 20 : Décroissance exponentielle des teneurs métalliques (mg/kg en échelle logarithmique) dans les boues produites par la station d'épuration de Seine-Aval de 1979 à 2000 (données SIAAP).

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)	Andrésey (2004)			(1986 & 1991)	(2000)	(1991)
	Gamme	Moy.	Gamme	% labile	Gamme	Gamme	Moy.	Gamme	% labile	Valeurs ponctuelles	Valeurs ponctuelles	Valeurs ponctuelles
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.

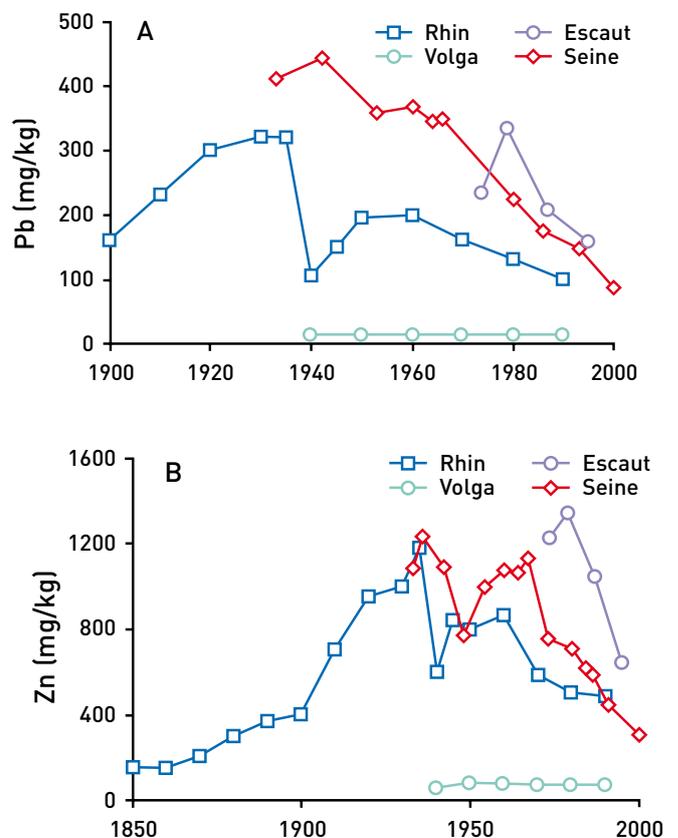


Figure 21 : Évolution comparée de 1900 à 2000 des teneurs en (A) plomb et (B) zinc particulaire dans la Seine, le Rhin, l'Escaut et la Volga : analyses sur carottes de sédiments.