



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] ;

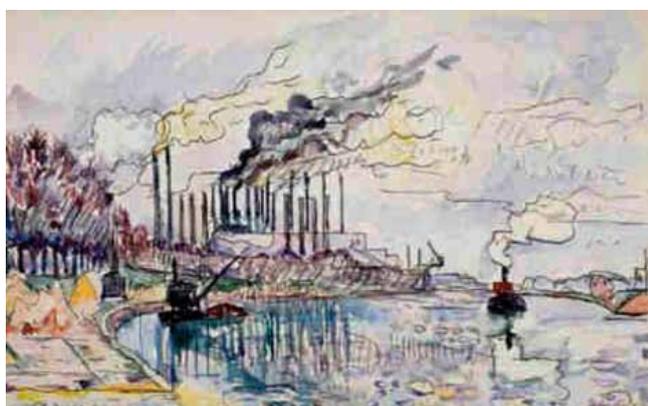
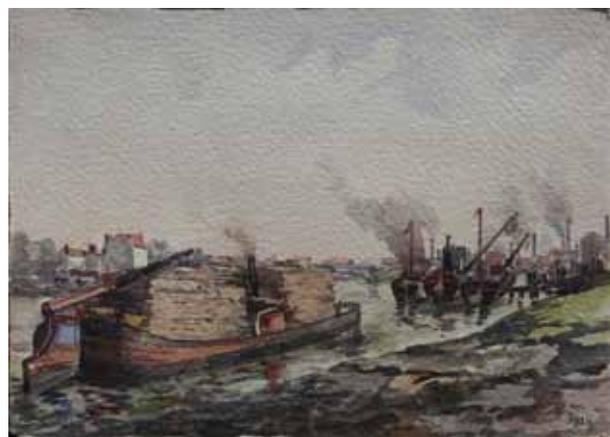


Figure 1 : Activité industrielle en région parisienne aux XIX^e et XX^e siècles :

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 feutrant 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.

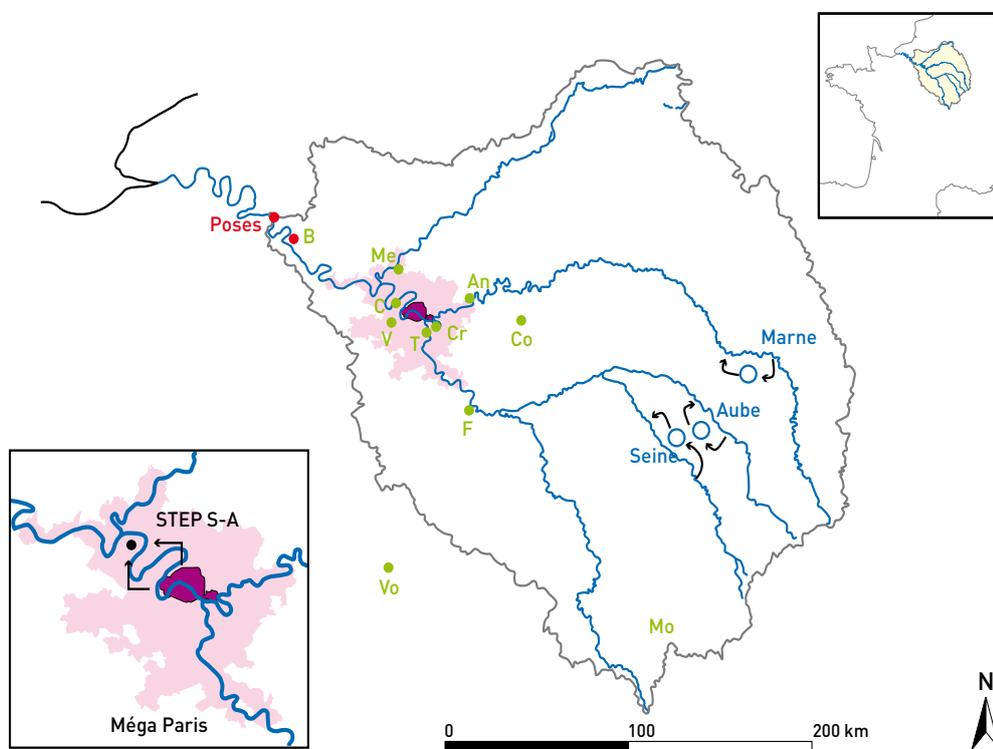


Figure 2 : Bassin de la Seine, à l'amont de l'estuaire à Poses, Méga Paris (en rose), station d'épuration de Seine-Aval (STEP S-A) et Paris intra muros (en violet).

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].

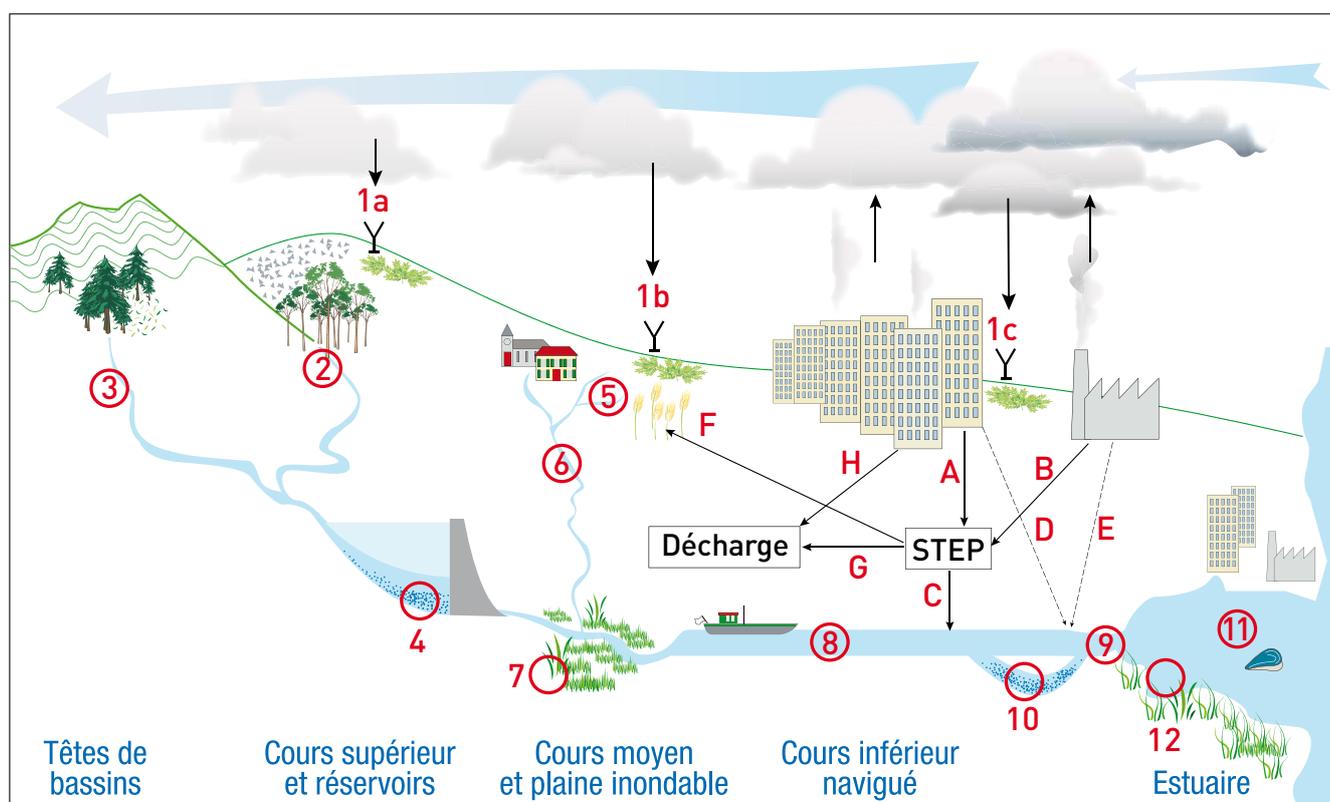


Figure 3 : Surveillance de la contamination métallique dans le bassin versant de la Seine.

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.

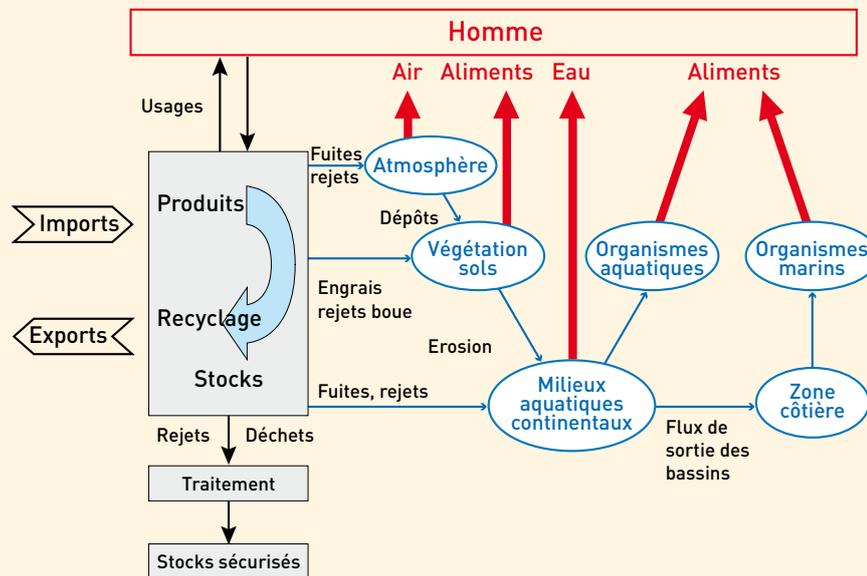


Figure 4 : Les voies de contamination d'un système fluvial sont multiples.

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.