

Bilan des connaissances sur la mobilité de l'antimoine dans l'environnement

L'antimoine, de symbole chimique Sb, est un élément naturellement présent dans l'environnement en faible concentration. Depuis plusieurs décennies, il est massivement utilisé dans différents secteurs industriels, notamment pour ses propriétés ignifuges et sa résistance à la chaleur. On le retrouve ainsi dans certains alliages, composants électroniques, matériaux plastiques, textiles, mais également dans les systèmes de freinage automobile.

En milieu urbain, le trafic routier constitue aujourd'hui une source majeure d'émission d'antimoine dans l'environnement. En effet, l'usure des plaquettes de frein produit des particules enrichies en antimoine qui sont progressivement dispersées sur les surfaces urbaines avant d'être mobilisées par le ruissellement lors de précipitations, ce qui peut amener à leur transfert vers des dispositifs de gestion des eaux pluviales.

À ce titre, les bassins routiers de rétention apparaissent comme des compartiments récepteurs accumulant une part importante des flux particuliers associés à l'antimoine. Pour autant, le cycle géochimique de ce contaminant urbain émergent est encore mal connu, tout comme ses éventuels effets sur l'environnement ou encore la contribution exacte des différentes sources de contaminations.

Pour répondre à ces interrogations, le PIREN-Seine a mené entre 2020 et 2025 une série de campagnes de prélèvements dans des bassins autoroutiers du bassin versant de l'Orge. Les données acquises mettent en évidence un gradient spatial marqué avec l'urbanisation : les concentrations s'avèrent plus faibles en milieu rural, et augmentent dans les zones périurbaines avant d'atteindre leurs valeurs maximales à proximité des axes routiers et des infrastructures de transport. Cette organisation spatiale suggère une origine majoritairement anthropique et confirme le rôle central du trafic routier dans les émissions d'antimoine à l'échelle du bassin.

Ces accumulations soulèvent d'importantes questions de gestion, notamment lors des opérations de curage des bassins. Les sédiments contaminés nécessitent en effet des filières adaptées de traitement ou de stockage, avec des coûts potentiellement élevés pour les gestionnaires. Mais cela pose aussi la question du transfert de cette contamination à partir de ces sources secondaires vers les milieux aquatiques ainsi que ses effets sur la faune et la flore.



La phase 9 du PIREN-Seine

Depuis le 1^{er} janvier 2025, le PIREN-Seine est entré dans sa phase 9, qui s'achèvera le 31 décembre 2028. Pour répondre aux enjeux environnementaux du bassin de la Seine, le programme s'est organisé en 5 axes de recherche, qui ont chacun pour objectif de répondre aux attentes des acteurs de la gestion de l'eau face aux défis du changement climatique, de la transition écologique de la société et de l'avenir de la ressource. Un sixième axe se consacre aux transferts de connaissances et aux données. Depuis sa phase 8, les recherches du PIREN-Seine sur l'antimoine s'intéressent à sa présence dans les environnements urbains, à son association avec les sédiments des bassins routiers et aux mécanismes géochimiques et microbiens qui contrôlent sa spéciation et sa mobilité vers les milieux aquatiques.

AXE 1 : Vulnérabilités des territoires face au changement climatique

AXE 2 : Les flux de matières et d'énergie dans les filières et leurs impacts territoriaux

AXE 3 : Histoire, paysage, territoires et restauration écologique

AXE 4 : Effets des contaminants sur la santé et les écosystèmes

AXE 5 : Dynamique des contaminants : de la compréhension des processus au métabolisme territorial

AXE 6 : Transfert des connaissances et gestion des données

Comprendre la géochimie de l'antimoine...

Les travaux menés dans le cadre du PIREN-Seine se sont appuyés sur l'étude de plusieurs bassins de rétention autoroutiers du bassin de la Seine recevant les eaux de ruissellement issues des infrastructures routières. Ces ouvrages constituent des environnements particulièrement pertinents pour étudier le devenir des contaminants associés au trafic automobile, car ils concentrent les particules transportées par le ruissellement et assurent leur accumulation dans les sédiments.

Une chimie complexe et versatile

Les campagnes réalisées en 2020 s'appuient sur différents échantillons prélevés dans le continuum route-bassin, incluant les bordures routières, les sédiments de bassins et les eaux interstitielles. Les résultats montrent que les bassins routiers présentent des teneurs en antimoine très supérieures au fond géochimique naturel, avec des enrichissements pouvant atteindre jusqu'à cent fois les niveaux de référence. Les concentrations les plus élevées sont observées dans les zones directement influencées par les apports routiers, confirmant le rôle du trafic automobile comme source dominante d'émission d'antimoine en milieu urbain.

Les analyses géochimiques mettent également en évidence une forte association de l'antimoine avec les fractions particulaires fines accumulées dans les sédiments. Ces résultats montrent que les bassins fonctionnent comme des zones de piégeage des contaminants routiers, où les particules enrichies en antimoine s'accumulent progressivement au cours du temps.

Une mobilité potentielle de l'antimoine

Les travaux réalisés en 2021 approfondissent ces premiers résultats en s'intéressant plus précisément aux mécanismes géochimiques contrôlant la mobilité du Sb dans les bassins routiers. Les analyses montrent notamment que l'antimoine est largement associé aux oxyhydroxydes de fer présents dans les sédiments, qui constituent des phases porteuses

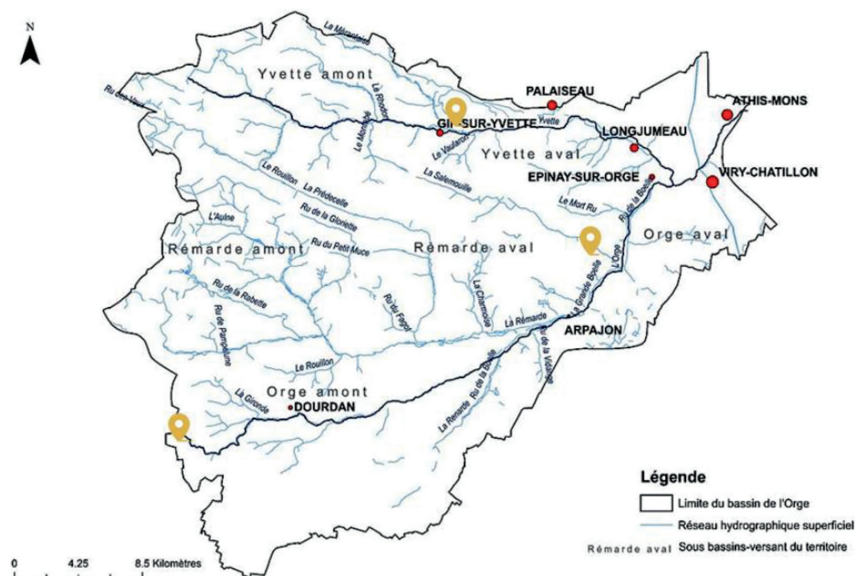
majeures du contaminant. Cette association joue un rôle central dans le stockage du Sb mais également dans sa mobilité potentielle, les changements de conditions physico-chimiques pouvant modifier les interactions entre l'antimoine et les phases minérales.

Les résultats mettent également en évidence des différences de spéciation entre les bordures routières et les zones immergées des bassins. Alors que les formes oxygénées Sb(III)-O et Sb(V)-O dominent en bord de route, les compartiments sous eau montrent également la présence de formes soufrées Sb(III)-S. Ces observations traduisent l'influence de conditions réductrices dans les bassins et suggèrent des transformations biogéochimiques actives au sein des sédiments, transformations ayant une potentielle influence sur la mobilité de cet élément.

Des travaux plus récents, réalisés en 2025, montrent que ces transformations peuvent évoluer rapidement lors des alternances entre conditions oxydiques et anoxiques dans les bassins routiers. Les expériences conduites sur les sédiments mettent en évidence la transformation progressive d'oxyhydroxydes de fer porteurs de Sb(V) en magnétite porteuse de Sb(III) en conditions anoxiques sous l'influence de l'activité microbienne. Lorsque les conditions redeviennent oxydiques, cette magnétite s'oxyde à son tour et favorise la formation de nouvelles phases riches en Sb(V).

Ces résultats montrent que les formes chimiques de l'antimoine évoluent en permanence sous l'effet des variations hydrologiques et géochimiques des bassins urbains. Même si les quantités de Sb relarguées dans la phase dissoute restent faibles dans les expériences réalisées, certaines formes apparaissent plus solubles et potentiellement plus mobiles dans l'environnement.

L'ensemble de ces travaux montre ainsi que les bassins routiers ne constituent pas uniquement des zones de stockage passif des contaminants urbains, mais des compartiments géochimiquement actifs capables de modifier les transferts de l'antimoine dans les hydroécosystèmes urbains.



Carte des cours d'eau du bassin versant de l'Orge (Source : www.orge-yvette.fr). Les puces indiquent les positions des bassins de l'étude.

...et sa mobilité dans l'environnement

Les résultats récents obtenus sur la géochimie de l'antimoine dans les bassins routiers montrent notamment que ce contaminant ne se limite pas à une accumulation statique dans les sédiments. En effet, les transformations de spéciation mises en évidence, sous l'effet des conditions redox et des phases minérales porteuses, conditionnent aussi la manière dont l'antimoine peut être remobilisé et transféré vers les milieux aquatiques. Ces découvertes permettent aussi de décrire le fonctionnement du continuum route-bassin-hydrosystème.

Le transfert de l'antimoine débute notamment par l'usure des systèmes de freinage, qui génèrent des particules enrichies en antimoine. Ces dernières sont ensuite redistribuées sur les surfaces urbaines, puis mobilisées lors des épisodes pluvieux. Le ruissellement constitue ainsi le principal vecteur de transfert vers les dispositifs de gestion des eaux pluviales, où les bassins jouent un rôle d'interface entre les sources routières et les milieux récepteurs.

Des compartiments de transfert et de stockage

Les variations hydrologiques, associées aux épisodes de remplissage et de vidange des bassins, modifient les conditions physico-chimiques des sédiments. Ces fluctuations influencent directement la stabilité des phases porteuses de l'antimoine identifiées précédemment. Dans ce contexte, certaines formes de l'antimoine peuvent ainsi être remobilisées et transférées vers les masses d'eau.

Les travaux expérimentaux montrent ainsi que les bassins constituent des systèmes réactifs, capables de transformer les formes chimiques du Sb et de contrôler sa partition entre la phase solide et la phase dissoute. Cette dynamique conditionne, en partie, le potentiel de transfert vers les hydrosystèmes en aval.

Le passage de l'antimoine vers les milieux aquatiques dépend donc fortement de sa spéciation. En effet, les formes associées aux phases particulières restent majoritaires, et

certaines conditions environnementales peuvent favoriser la mise en solution d'une fraction de l'antimoine.

Les épisodes hydrologiques intenses, comme des crues lors de fortes précipitations, associés à la remise en suspension des sédiments fins, constituent des périodes clés de transfert. Dans ces conditions, les particules enrichies en antimoine peuvent être exportées hors des bassins routiers vers les réseaux d'assainissement, puis vers les cours d'eau.

Cependant, les travaux en conditions contrôlées en laboratoire montrent que la quantité effectivement transférée à l'état dissous reste globalement faible au regard des stocks présents dans les sédiments. Le transfert vers les hydrosystèmes apparaît donc comme un processus intermittent, contrôlé à la fois par les événements hydrologiques et par les transformations géochimiques internes aux bassins.

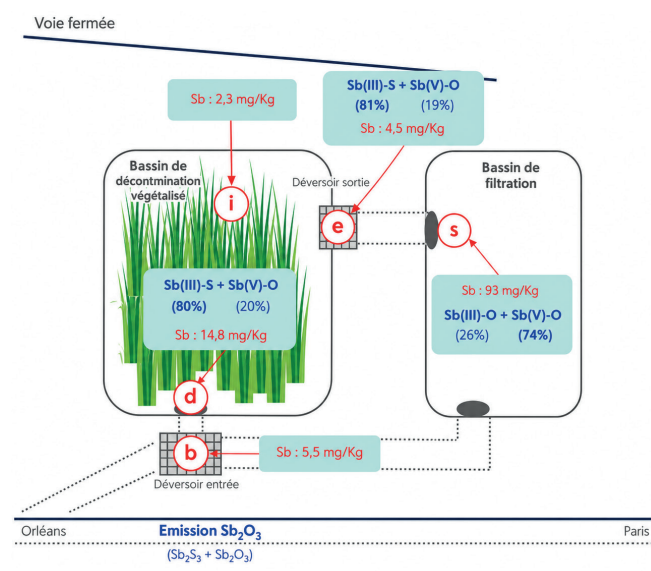


Schéma du bassin de Bréthencourt présentant les points de prélèvement, les concentrations en antimoine et la proportion relative des différentes spéciations mesurées à chacun de ces points.

Rôle des microorganismes dans le cycle de l'antimoine

Les travaux menés plus spécifiquement dans le bassin de Bréthencourt (Cofiroute, VINCI Autoroutes) montrent que des microorganismes sont susceptibles de participer aux transformations de l'antimoine. Des gènes impliqués dans l'oxydation du Sb(III) et la réduction du Sb(V) ont été détectés dans l'ensemble du bassin, tandis que des gènes de résistance témoignent d'une adaptation des communautés microbiennes à la contamination.

La composition du microbiome varie selon les compartiments du bassin et les conditions locales. Ces microorganismes pourraient ainsi contribuer aux changements de spéciation de l'antimoine et influencer sa mobilité dans l'environnement, notamment en connexion avec les cycles biogéochimiques du fer et du soufre. Ces interactions microbiologiques contribuent ainsi à la dynamique globale du système, en influençant la

spéciation de l'antimoine et, par conséquent, sa mobilité potentielle vers les milieux aquatiques.

Une continuité directe avec les résultats de géochimie

Ainsi, les mécanismes mis en évidence dans les études de spéciation et de géochimie expliquent en partie les comportements observés à l'échelle du continuum urbain. L'association de l'antimoine aux phases minérales, sa transformation sous l'effet des conditions redox et les processus microbiens contribuent ensemble à déterminer son devenir dans les systèmes de gestion des eaux pluviales.

Cette approche intégrée permet de relier les dynamiques internes des bassins à la question plus large du transfert des contaminants vers les hydrosystèmes du bassin de la Seine.

Enjeux et perspectives pour la gestion

Un contaminant principalement piégé dans les sédiments

Les travaux du PIREN-Seine montrent que, malgré des enrichissements importants en antimoine dans les bassins routiers, le contaminant reste majoritairement associé aux sédiments. Les expériences menées sur les bassins étudiés mettent en évidence un relargage limité vers la phase dissoute dans les conditions testées, suggérant un transfert relativement faible vers les milieux aquatiques.

Ces résultats ne remettent toutefois pas en cause la nécessité d'une gestion adaptée des ouvrages de rétention. Les sédiments accumulés dans les bassins concentrent les apports issus du trafic routier et constituent le principal compartiment à surveiller, notamment lors des opérations de curage et de traitement des boues. L'antimoine apparaît ainsi moins comme une menace immédiate pour la qualité des eaux de surface que comme un enjeu émergent pour la gestion des matériaux contaminés issus des infrastructures urbaines.



Comprendre les mécanismes pour anticiper son évolution

Au-delà de la mesure des concentrations de ce contaminant, les travaux du PIREN-Seine ont permis de mieux comprendre les mécanismes à l'échelle moléculaire contrôlant le devenir de l'antimoine dans les bassins routiers. Sa mobilité dépend de sa spéciation chimique, des transformations des phases minérales auxquelles il est associé et des variations des conditions physico-chimiques et d'oxydoréduction du milieu.

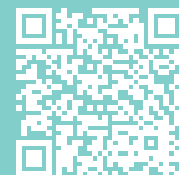
Les recherches récentes montrent également que les communautés microbiennes jouent un rôle dans cette dynamique en participant aux réactions d'oxydoréduction de l'antimoine et en influençant les cycles du fer et du soufre. Ces interactions contribuent à modifier les formes chimiques du Sb et peuvent donc influencer sa mobilité potentielle.

Plusieurs questions restent aujourd'hui ouvertes : comment évolueront les flux d'antimoine avec les transformations des matériaux routiers et des systèmes de freinage ? La diminution ou l'évolution des usages modifiera-t-elle cette pression dans les prochaines décennies ? Le suivi à long terme permettra de mieux évaluer la trajectoire de ce contaminant urbain et d'accompagner les gestionnaires dans l'adaptation de leurs pratiques. Des études à plus large échelle sont également en cours pour comprendre la dynamique du Sb en ville, par exemple au moyen de l'analyse de sédiments routiers ou de poussières urbaines.



Pour plus d'informations,
rendez-vous sur
www.piren-seine.fr

Contact :
francois.mercier
@arceau-idf.fr



Crédits photos : Maëva Philippe

Édition : ARCEAU-Idf 2026 - www.arceau-idf.fr

Création graphique : id bleue (Sablé)
www.idbleue.com

ISSN : 2610-0916

Sources bibliographiques : https://piren-seine.fr/publications/fiches_4_pages/bilan_des_connaissances_sur_la_mobilite_de_lantimoine_dans

Le **PIREN-Seine** est un programme de recherche interdisciplinaire dont l'objectif est de développer une vision d'ensemble du fonctionnement du bassin versant de la Seine et de la société humaine qui l'investit, pour permettre une meilleure gestion qualitative et quantitative de la ressource en eau.

Cette fiche est éditée par la *Cellule transfert* du PIREN-Seine, animée par l'association ARCEAU-Idf.

Les partenaires opérationnels de la phase 9 du PIREN-Seine



Les partenaires scientifiques de la phase 9 du PIREN-Seine

