

Multi-contaminations et Impacts en contexte Péri-Urbain : le bassin versant de l'Orge comme site modèle

Cécile Quantin^{1*}, Florence Hulot², Elodie Guigon³, Aurélie Goutte³, Gaël Monvoisin¹,
Christophe Hanot², Fabrice Alliot³, Leïa Daudin³, Delphine Thomas⁴

¹ Université Paris Saclay — CNRS, UMR8148 GEOPS, Orsay

² Université Paris Saclay — CNRS, ESE, Orsay

³ Sorbonne Université, CNRS, EPHE, PSL, UMR METIS, Paris

⁴ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) – UMR8212, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris Saclay

* cecile.quantin@universite-paris-saclay.fr

Résumé

Ce rapport présente le cadre analytique et les tout premiers résultats de l'étude pluridisciplinaire menée sur l'impact des multi-contaminations sur les organismes aquatiques, en contexte périurbain. Dans ce contexte, les teneurs en éléments traces, HAP, certains pesticides et produits pharmaceutiques sont quantifiées dans les phases dissoutes et particulaires, au niveau de quatre sites suivis de façon discontinue depuis 2001, dans le bassin versant de l'Orge, en périodes de basses, moyennes et hautes eaux. Sur ces mêmes sites, la diversité et l'abondance locales des macro-invertébrés aquatiques, indicateurs de perturbations, sont déterminées pour en déduire des indices écologiques et l'impact de l'urbanisation, en basses eaux (sortie d'été) et hautes eaux (printemps) pendant deux années. Les premiers résultats obtenus sur la fraction dissoute en basses eaux montrent que les concentrations en V, Cu, Zn, et Pb, augmentent significativement avec le gradient d'urbanisation. Sur les 58 composés organiques recherchés, 30 molécules ont été quantifiées (17 pesticides sur 30, 3 antibiotiques sur 13 et 10 médicaments sur 15). Le site le plus amont de l'Orge est le moins contaminé sauf pour les pesticides, alors que sur l'Yvette, les pesticides sont moins présents, mais on observe une contamination en médicaments. Le site de Saint-Germain-lès-Arpajon, en aval de la station de traitement des eaux usées, présente les concentrations et le nombre de composés dissous les plus élevés. Enfin, en aval de la confluence de l'Orge et de l'Yvette, le site de Viry est moins concentré que celui de Saint-Germain-lès-Arpajon pour les antibiotiques et les médicaments, mais pas pour les pesticides. Les communautés biologiques semblent montrer des différences de structure et de diversité entre les quatre sites. Ces premiers résultats seront complétés par un suivi sur deux années afin de comprendre le lien entre multi-contaminations et diversité des macro-invertébrés aquatiques.

Points clefs

- ✓ *En basses eaux, les concentrations en V, Cu, Zn, et Pb augmentent significativement avec le gradient d'urbanisation*
- ✓ *Sur les 58 composés organiques recherchés, 30 molécules ont été quantifiées dans la fraction dissoute sur les quatre sites (17 pesticides sur 30, 3 antibiotiques sur 13 et 10 médicaments sur 15).*
- ✓ *Les communautés de macro-invertébrés aquatiques montrent des différences de structure et de diversité entre les quatre sites*

Abstract

This report presents the analytical framework and initial results of a multidisciplinary study conducted on the impact of multiple contaminants on aquatic organisms in a peri-urban context. In this context, the concentrations of trace elements, PAHs, certain pesticides and pharmaceuticals are quantified in dissolved and particulate phases at four sites monitored intermittently since 2001 in the Orge river basin during low, medium and high water periods. At these same sites, the local diversity and abundance of aquatic macroinvertebrates, which serve as indicators of disturbance, are assessed to determine ecological indices and the impact of urbanization during low-water (late summer) and high-water (spring) periods over two years. The initial results obtained for the dissolved fraction during low water levels show that concentrations of V, Cu, Zn, and Pb increase significantly with the urbanisation gradient. Of the 58 organic compounds studied, 30 molecules were quantified (17 pesticides out of 30, 3 antibiotics out of 13 and 10 medicines out of 15). The site furthest upstream on the Orge is the least contaminated except for pesticides, while on the Yvette, pesticides are less prevalent, but contamination from medicines has been observed. The site at Saint-Germain-lès-Arpajon, downstream from the wastewater treatment plant, has the highest concentrations and number of dissolved compounds. Finally, downstream from the confluence of the Orge and Yvette rivers, the Viry site has lower concentrations than Saint-Germain-lès-Arpajon for antibiotics and pharmaceuticals, but not for pesticides. The biological communities appear to show differences in structure and diversity between the four sites. These initial results will be supplemented by a two-year follow-up study to understand the link between multi-contamination and the diversity of aquatic macroinvertebrates.

Key points

- ✓ During low water periods, concentrations of V, Cu, Zn, and Pb increase significantly with the urbanisation gradient.
- ✓ Of the 58 organic compounds studied, 30 molecules were quantified in the dissolved fraction at the four sites (17 pesticides out of 30, 3 antibiotics out of 13, and 10 medicines out of 15).
- ✓ Aquatic macroinvertebrate communities show differences in structure and diversity between the four sites.

1. Introduction

Dans les espaces périurbains et urbains, les rivières avec les mares et étangs sont les principaux réceptacles de nombreux contaminants (éléments traces métalliques - ETM, pesticides, hydrocarbures aromatiques polycycliques - HAP, produits pharmaceutiques...), principalement par le biais du ruissellement sur les surfaces imperméables et de l'érosion des sols contaminés. Le développement des activités urbaines et industrielles le long des cours d'eau après-guerre a contribué à la forte détérioration de leur qualité en aval de ces zones (Tockner et al., 2022). Si depuis 50 ans les activités industrielles dans le bassin versant de la Seine ont tendance à diminuer, l'intensification de l'agriculture et le développement périurbain contribuent à fragiliser les écosystèmes aquatiques et ont un fort impact sur l'environnement (Zhao *et al.*, 2023; Owens and Rutherford, 2023). Les systèmes périurbains sont ainsi confrontés à deux types de contaminations : contaminations issues des activités agricoles avec des excès de nutriments, fertilisants et pesticides, et des contaminations en ETM, HAP et produits pharmaceutiques associés au développement urbain. Ils constituent

ainsi des environnements particulièrement sensibles pour la biodiversité et la qualité des milieux aquatiques, qu'il convient de documenter.

À l'échelle du bassin versant, de nombreuses voies et sources de contamination existent, et leur contribution respective est souvent difficile à évaluer à l'aide des seules concentrations de polluants. Les rapports isotopiques des métaux et les rapports de composés organiques peuvent fournir des indications plus précises sur les sources et les processus bio-physico-chimiques les affectant (par ex. Quantin et Guinoiseau, 2022, Yunker *et al.*, 2002). Les sols agricoles et (péri)urbains peuvent avoir accumulé des quantités de polluants élevées par rapport au bruit de fond géochimique local, d'origine atmosphérique ou liées aux apports de pesticides et fertilisants (Gateuille *et al.*, 2020, Gasperi *et al.*, 2017, Ballabio *et al.*, 2024, Froger *et al.*, 2023). Leur érosion peut contribuer à la contamination des eaux de surface aval. Il s'avère donc indispensable de déterminer si les contaminations mesurées aujourd'hui en rivières sont principalement expliquées par la remobilisation d'une pollution dite historique ou par des rejets actuels de ces substances. Les radionucléides retombant en continu avec les pluies et présentant une demi-vie contrastée tels que le ^7Be (T1/2 = 54 jours) et le ^{210}Pb (T1/2 = 22 ans) peuvent apporter des réponses à cette question (Evrard *et al.*, 2010 ; Froger *et al.*, 2018).

Par ailleurs, l'impact de ces contaminations sur les organismes vivant dans les différents habitats des rivières doit être connu afin de pouvoir proposer des actions ciblées pour leur restauration (Bonnard *et al.*, 2012). Ainsi, l'utilisation d'indicateurs biologiques intégrant la variabilité spatiale et temporelle des concentrations de contaminants dans les eaux de surface peut contribuer à mettre en évidence l'état de contamination de l'eau. Les macro-invertébrés recouvrent un ensemble de taxa riche et diversifié que l'on retrouve dans tous les systèmes aquatiques. Ils montrent une large gamme de sensibilité aux stress environnementaux et, pour cette raison, leurs diversité et abondance locales sont communément utilisées comme indicateurs de perturbations (Sumudumali et Jayawardana, 2021 ; Tachet *et al.*, 2010). Certains de ces invertébrés comme les bivalves (organismes filtrants) ou les amphipodes (organismes détritivores) sont ainsi considérés comme de bonnes espèces sentinelles.

De nombreux travaux pilotés par les gestionnaires de bassin, les agences de l'eau et le PIREN-Seine ont montré que, même si des efforts significatifs ont été réalisés pour améliorer la qualité des eaux, il ne sera pas possible d'atteindre les objectifs de la DCE, notamment en Île-de-France, sans un effort majeur de suivi des sous-bassins, pour bien identifier les sources et flux de contaminants historiques, mais aussi émergents. En effet, les contaminants hérités comme Pb, Zn, ou certains HAP et pesticides sont problématiques en raison de leur toxicité et de leur persistance, en particulier dans les sols et les sédiments. Outre ces contaminants historiques, le comportement en rivière des contaminants émergents, tels que des produits pharmaceutiques ou le Sb, reste mal compris.

Dans ce contexte, l'action proposée vise à améliorer la caractérisation des contaminations multiples et leur toxicité globale sur les organismes aquatiques, en contexte périurbain, par un suivi de plusieurs contaminants (« cocktail ») historiques (éléments traces métalliques, HAP) et émergents (produits pharmaceutiques, pesticides, certains métalloïdes comme Sb) dans le bassin versant de l'Orge, et à déterminer leur impact sur le biote grâce à des indicateurs macro-invertébrés aquatiques (Hulot *et al.*, 2024). Pour cela, les teneurs en éléments traces, HAP, certains pesticides et produits pharmaceutiques seront déterminées dans les phases dissoutes et particulaires, au niveau de 4 sites suivis de façon discontinue depuis 2001, en périodes de basses, moyennes et hautes eaux, notamment dans le cadre des phases précédentes du PIREN-Seine. Sur ces sites, la diversité et l'abondance locale des macro-invertébrés aquatiques, indicateurs de perturbations, seront déterminées et analysées pour en déduire des indices écologiques et l'impact de l'urbanisation, en basses eaux (sortie d'été) et hautes eaux (printemps) pendant deux années. Le présent rapport présente le cadre analytique et les tout premiers résultats.

Le bassin versant de l'Orge (956 km²), sous-bassin versant de la Seine, est caractérisé par un mode d'occupation des sols très contrasté, avec une dominance de forêts et de terres agricoles en amont et une zone densément peuplée en aval (Fig. 1), dont l'état écologique (Fig. 2) est fortement contrasté entre l'amont (mauvais) à l'aval (moyen). En outre, plusieurs zones humides sont présentes dans le bassin versant, soit le long de l'Orge et de ses affluents, soit sur le plateau de Saclay. Ce site d'étude en contexte périurbain est donc représentatif de la plupart des conditions rencontrées dans les régions tempérées de basse altitude en Europe. Dans ce bassin versant, les concentrations d'ETM urbains (Pb, Zn, Cu et Sb) ainsi qu'en HAP augmentent considérablement dans les charges dissoutes et particulaires le long du gradient d'urbanisation (Le Pape *et al.*, 2012, Froger *et al.*, 2018 et 2019). Par ailleurs, les contaminants organiques en traces dissous comme les produits pharmaceutiques ou pesticides sont influencés par les rejets des stations d'épuration, ce qui apparaît

moins net pour les MES ou les sédiments de fond, car la variabilité de la composition organo-minérale de ces échantillons influe fortement sur leur aptitude à la sorption (Le Gaudu *et al.*, 2022). Colin *et al.* (2021) ont montré que le degré d'urbanisation du bassin versant de l'Orge pouvait jouer un rôle déterminant dans la régulation de la diversité phylogénétique et de la composition des communautés microbiennes présentes sur la peau des poissons. L'importance de l'urbanisation s'avère beaucoup plus modérée pour le microbiote gastro-intestinal.

2. Matériel et méthodes

2.1. Échantillonnage

La stratégie d'échantillonnage choisie a pour objectif d'être représentative de la variation spatiale de l'occupation du sol (Fig. 1), de la densité d'habitants et également du régime hydrologique de la rivière.

La démarche suivie est similaire à celle suivie lors des travaux de Froger *et al.* (2018, 2019). Les sites ont été choisis car ils représentent de manière efficace le gradient d'urbanisation et sont similaires à ceux de Colin *et al.* (2021), auxquels a été ajouté le site de l'Yvette, situé sur le campus d'Orsay et suivi depuis 2009 (Le Pape *et al.*, 2012). Deux campagnes d'échantillonnage ont été menées en 2025, respectivement les 20 juin et 20-24 octobre en basses eaux, la campagne d'octobre intégrant la collecte de macro-invertébrés et les mesures des polluants organiques.

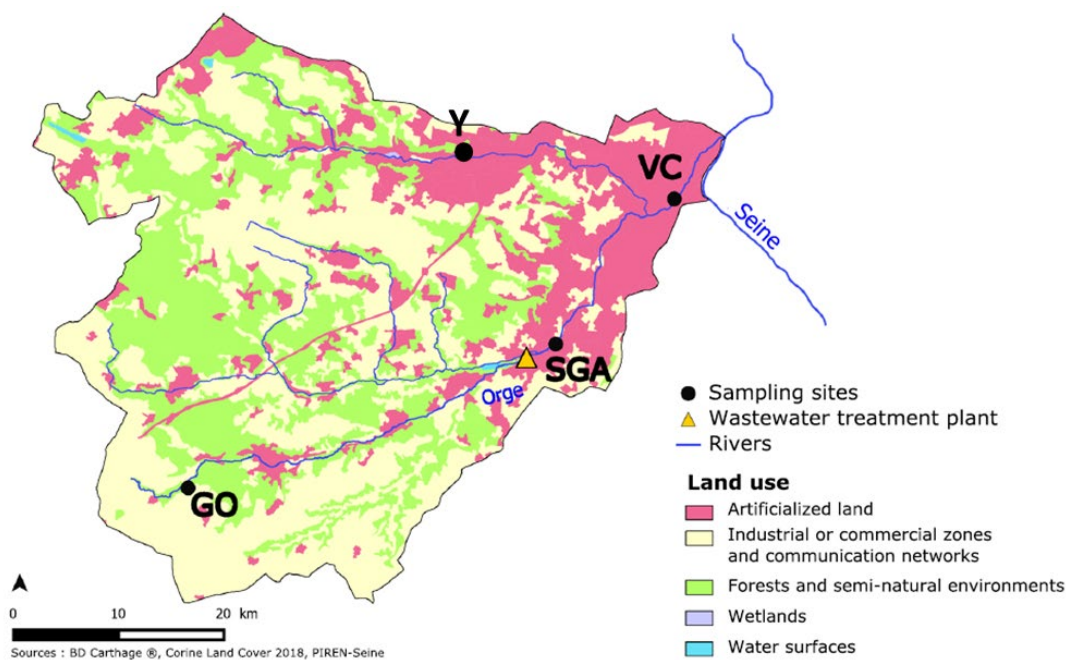


Figure 1. Localisation des sites d'échantillonnage superposés à l'utilisation des sols (adapté de Colin *et al.*, 2021). GO : Gué d'Orge, SGA : Saint-Germain-lès-Arpajon, VC : Viry-Châtillon, Y : Yvette à Orsay

L'échantillonnage a été organisé de manière à intégrer les contraintes liées aux analyses des différents polluants organiques et inorganiques suivis et des radionucléides (conditionnement, quantités de matériel nécessaires aux analyses). Ainsi, deux types d'échantillons ont été prélevés en rivière : des échantillons ponctuels d'eau de rivière comprenant les phases dissoutes et particulaires, et des échantillons intégratifs de matières en suspension (MES) prélevés 5 jours après le déploiement de pièges à sédiments, ainsi que des prélèvements de sédiments de fond de rivière.

Pour les polluants inorganiques et les radionucléides, les échantillons ponctuels ont été prélevés avec des bidons de 30 L préalablement nettoyés, ainsi qu'avec des bouteilles de 1 L afin de déterminer la teneur en MES. Tous ces échantillons ont été filtrés à 0,2 µm rapidement après l'échantillonnage. Les MES des bidons de 30 L sont récupérées et séchées à 40 °C. Des aliquotes de filtrats ont été récupérées pour l'analyse des anions, cations majeurs et éléments en trace, ainsi que pour la mesure de l'alcalinité.

Pour les contaminants organiques et le carbone organique dissous (DOC), la colonne d'eau a été échantillonnée dans des bouteilles en aluminium. Le lendemain des prélèvements, les échantillons ont été filtrés à 0,7 µm sur filtres GFF préalablement calcinés, et pour le DOC, une seconde filtration à 0,45 µm a été réalisée.

Les pièges à sédiments ont été déployés pendant 5 jours : des bouteilles de 600 mL en aluminium avaient été lestées et percées au préalable afin de collecter les MES par sédimentation. Lors de leur récupération, les échantillons de pièges à sédiments et les sédiments de fond de rivière ont été placés dans des flacons de verre préalablement lavés puis lyophilisés en laboratoire.

En parallèle des collectes d'échantillons, les mesures de pH, conductivité et température ont été réalisées sur le terrain.

2.2. Analyses

Les matières en suspension ont été séchées puis broyées finement. Environ 100 mg d'échantillon ont ensuite été dissous par des attaques acides successives (Le Pape et al., 2012). Pour chaque échantillon, trois réplicats ont été minéralisés, ainsi qu'un matériau de référence (SL1, AIEA) et un blanc expérimental.

Les concentrations en éléments majeurs et traces des MES minéralisées et des échantillons d'eau acidifiés ont été mesurées par ICP-MS quadropolaire (ICP-QMS, X-Series, CCT II & Thermoelectron, France; Froger *et al.*, 2020). Un matériau de référence d'eau de rivière (SRM 1640a, NIST, USA) a été utilisé pour contrôler la justesse de mesure de l'ICP-QMS et des étalons internes (Re, Rh, In) ont été utilisés afin de corriger la dérive machine. La répétition des analyses du matériau de référence SL-1 ainsi que les réplicats permettent d'évaluer la précision générale de la mesure. Les anions ont été quantifiés dans les aliquotes non acidifiées par chromatographie ionique d'échange anionique (DIONEX ICS-1000).

Enfin, les concentrations en C, N et S des matières en suspension brutes seront déterminées par CHNS-O Flash 2000 OEA après combustion sèche.

Pour les polluants organiques, les eaux filtrées sont extraites sur phase solide (SPE) à l'aide de cartouches HLB. Après lyophilisation, les sédiments ont été tamisés à 1 mm avant leur extraction par solvant (Dionex ASE 350). Après extraction, les échantillons sont analysés en chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en tandem pour les HAP, phtalates, polychlorobiphényles — PCB, composés organochlorés, et en chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem pour les pesticides et composés pharmaceutiques. Les protocoles sont détaillés dans les publications de Marchand *et al.*, 2024 et Lorrain Soligon *et al.*, 2025.

Le DOC est quantifié par oxydation thermique (à 680 °C) avec un catalyseur Pt (Shimadzu TOC-L-CSH).

2.3. Collecte des macro-invertébrés

Les macro-invertébrés aquatiques ont été collectés dans les différents habitats présents pour chacun des sites. Ils sont triés *in situ*, identifiés et comptés au laboratoire, afin d'explorer leur diversité spatio-temporelle et de comprendre les effets des contaminants sur l'abondance et la structure de la communauté. La diversité des communautés d'invertébrés sera explorée par le calcul de la richesse des morphotaxons (diversité alpha), l'indice de diversité de Shannon et la régularité pour chaque site de prélèvement et chaque campagne de terrain avec la fonction *specnumber* de vegan 2.5-6 [31]. L'effet de chaque site et de chaque campagne de terrain sur ces paramètres sera testé avec une analyse de variance suivie d'une comparaison par paire.



Figure 2. État écologique de l'Orge et de son affluent, l'Yvette, en 2025 (données des agences de l'eau sur la qualité de l'eau des rivières de France disponibles sur l'application « Qualité rivière »).

3. Premiers résultats

Seuls quelques résultats en phase dissoute sont actuellement disponibles. Les premiers résultats de la campagne de juin montrent que les teneurs en métaux dissous sont dans la même gamme que celles mesurées sur les campagnes de 2010-2011 (Le Pape *et al.*, 2012) et de 2015-2016 (Froger *et al.*, 2020), sauf le plomb, dont les concentrations sont inférieures d'un facteur 10 environ à celles mesurées en 2015-2016. Par exemple, les concentrations en V, Cu, Zn, et Pb, augmentent significativement d'amont en aval, *i.e.* avec le gradient d'urbanisation (Fig. 3). Le lithium, qui n'avait pour l'instant pas été suivi dans le bassin versant de l'Orge, présente une forte évolution d'amont en aval qu'il conviendra d'expliquer.

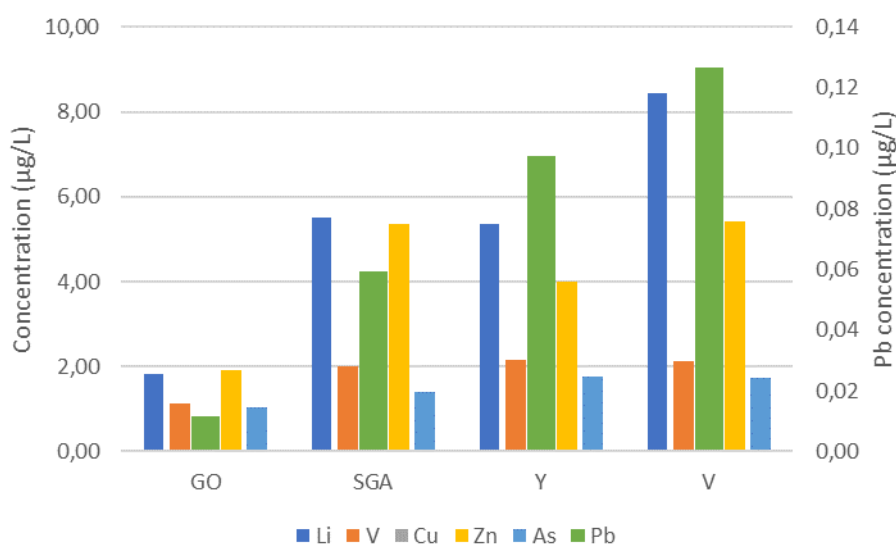


Figure 3. Évolution des concentrations d'une sélection de métaux dissous d'amont en aval (prélèvement de juin 2025)

Les premiers résultats de la campagne d'octobre concernent les pesticides et composés pharmaceutiques dans la phase dissoute. Sur les 58 composés recherchés (Fig. 4), 30 molécules ont été quantifiées (17 pesticides sur 30, 3 antibiotiques sur 13 et 10 médicaments sur 15). Le paracétamol est le composé le plus concentré avec une moyenne de 833 ng/L sur les 4 sites, suivi par deux pesticides : le chortoluron (138 ng/L) et la

carbendazime (106 ng/L). L'antibiotique avec les plus fortes concentrations est la sulfaméthoxazole (81 ng/L). Ces résultats sont en cohérence avec les mesures réalisées en 2020 sur l'Orge (Le Gaudu *et al.*, 2022).

Le site en amont de l'Orge, Gué d'Orge, est le moins contaminé sauf pour les pesticides (Fig. 5). En revanche, sur le site amont sur l'Yvette, les pesticides sont moins présents, mais on observe une contamination en médicaments. Le site de Saint-Germain-lès-Arpajon, en aval de la station de traitement des eaux usées, présente les concentrations et le nombre de composés les plus élevés. Enfin, en aval de la confluence de l'Orge et de l'Yvette, le site de Viry est moins concentré que SGA pour les antibiotiques et les médicaments, mais pas pour les pesticides.

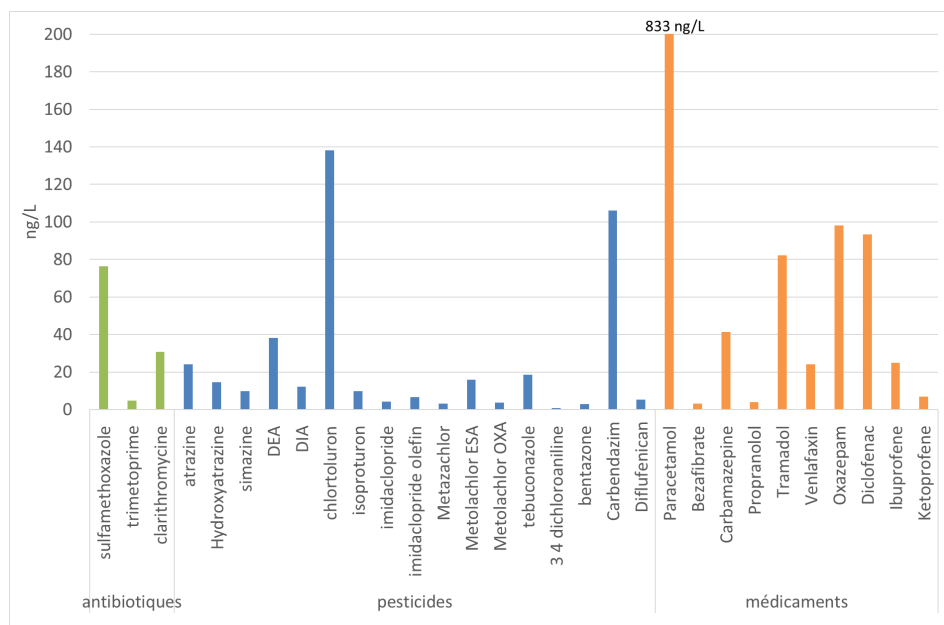


Figure 4 : Concentrations moyennes sur les 4 sites en pesticides et composés pharmaceutiques lors de la campagne du 20 octobre 2025 (ng/L)

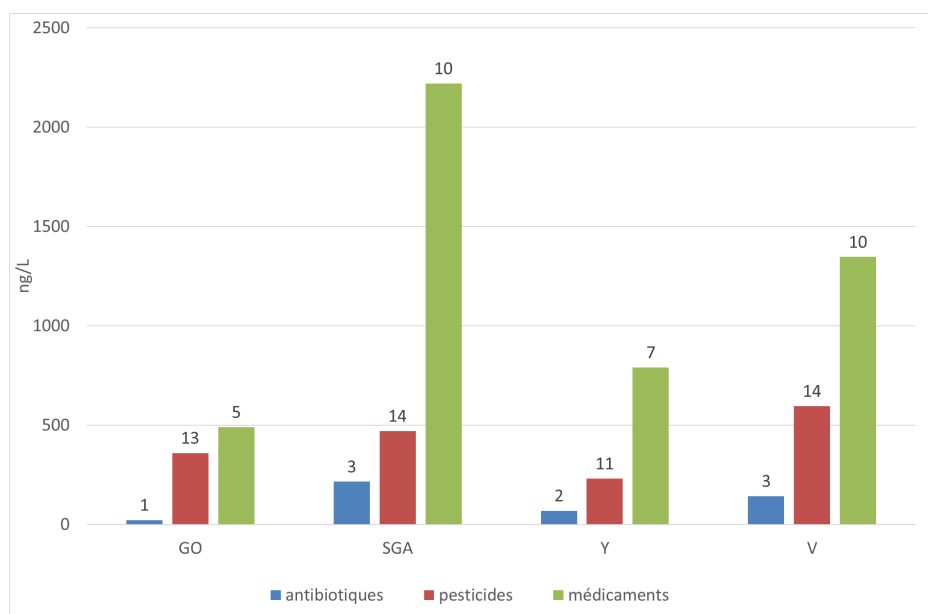


Figure 5. Concentrations en somme par famille de composés (ng/L) et nombre de molécules quantifiées par famille de composés

Ces résultats préliminaires seront complétés par les diverses analyses prévues, puis comparés aux analyses sur les communautés biologiques. Néanmoins, en première approche, les échantillons ont été pour l'instant uniquement vérifiés de manière très superficielle sans identification fine ni dénombrement, mais quelques différences de structure et de diversité entre les quatre sites semblent apparaître. Les richesses entre Gué

d'Orge, Saint-Germain-lès-Arpajon sur l'Orge et Orsay sur l'Yvette semblent comparables avec, pour Orsay, la présence de plusieurs espèces de Coléoptères considérés comme marqueurs de bonne qualité d'eau (Famille des Elmidae), La station de Viry-Chatillon semble quant à elle montrer actuellement la diversité la plus faible. Les identifications des échantillons sont en cours, les analyses suivront.

Bibliographie

- Ballabio C., A. Jones, and P. Panagos (2024). Cadmium in topsoils of the European Union – An analysis based on LUCAS topsoil database. *Science of the Total Environment* 912, 168710
- Bonnard M., I. Barjhoux, O. Dedourge-Geffard, A. Goutte, L. Oziol, M. Palos-Ladeiro, and A. Geffard (2012). Experience Gained from Ecotoxicological Studies in the Seine River and Its Drainage Basin Over the Last Decade: Applicative Examples and Research Perspectives, in *The Seine River Basin* pp 243–268,
- Colin, Y., Berthe, T., Molbert, N., Guigon, E., Vivant, A. L., Alliot, F., Collin, S., Goutte, A. and Petit, F. (2021). Urbanization constrains skin bacterial phylogenetic diversity in wild fish populations and correlates with the proliferation of aeromonads. *Microbial ecology*, 82(2), 523-536.
- Evrard O, Némery J, Gratiot N, Duvert C, Ayrault S, Lefèvre I, Poulenard J, Prat C, Bonté P, and Esteves M (2010). Sediment dynamics during the rainy season in tropical highland catchments of Central Mexico using fallout radionuclides. *Geomorphology* 124:42–54
- Froger C, Ayrault S, Evrard O, Monvoisin G, Bordier L, Lefèvre I, and Quantin C (2018). Tracing the sources of suspended sediment and particle-bound trace metal elements in an urban catchment coupling elemental and isotopic geochemistry, and fallout radionuclides. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 28667-28681
- Froger C, Ayrault S, Gasperi J, Caupos E, Monvoisin G, Evrard O, and Quantin C (2019). Innovative combination of tracing methods to differentiate between legacy and contemporary PAH sources in the atmosphere-soil-river continuum in an urban catchment (Orge River, France). *Science of the Total Environment*, 669, 448-458
- Froger C., Quantin C., Bordier L., Monvoisin G., Evrard O., Ayrault S (2020). Quantification of spatial and temporal variations in trace element fluxes originating from urban areas at the catchment scale. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 4055–4069
- Froger,C, Jolivet, C, Budzinski, H, Pierdet, M, Caria, G, Saby, N.P.A., Arrouays, D, and Bispo, A. (2023). Pesticide Residues in French Soils: Occurrence, Risks, and Persistence. *Environmental Science Technology* 57, 7818–7827
- Gateuille, D., J. Gasperi, C. Briand, E. Guigon, F. Alliot, M. Blanchard, M.-J. Teil, M. Chevreuil, V. Rocher, S. Azimi, D. Thevenot, R. Moilleron, J.-M. Brignon, M. Meybeck, and J.-M. Mouchel (2020). Mass Balance of PAHs at the Scale of the Seine River Basin, *The Seine River Basin*. In: Flipo, N., Labadie, P., Lestel, L. (eds) *The Seine River Basin. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 90. Springer, pp 163–187
- Gaspéri, J, S. Ayrault, E. Moreau-Guigon, F. Alliot, P. Labadie, H. Budzinski, M. Blanchard, B. Muresan, E. Caupos, M. Cladière, D. Gateuille, B. Tassin, L. Bordier, M.-J. Teil, C. Bourges, A. Desportes, M. Chevreuil, and R. Moilleron (2017). Contamination of soils by metals and organic micropollutants: case study of the Parisian conurbation, *Environ Sci Pollut Res*, doi 10.1007/s11356-016-8005-2
- Hulot FD, Hanot C, Néliou S, Lamy I, Karolak S, Delarue G, Baudry E (2024) Do macroinvertebrate abundance and community structure depend on the quality of ponds located in peri-urban areas? bioRxiv, ver. 3, peer-reviewed and recommended by Peer Community in Ecotoxicology and Environmental Chemistry. <https://hal.science/hal-04850220v1>
- Le Gaudu, M., T. Thiebault, K. Quénéa, F. Alliot, E. Guigon, and L. Le Callonnec (2022). Trace organic contaminants within solid matrices along an anthropized watercourse: Organo-mineral controls on their spatial distribution. *Science of The Total Environment* 822:153601.
- Le Pape P, Ayrault S, and Quantin C (2012) Trace element behavior and partition versus urbanization gradient

in an urban river (Orge River, France). *Journal of Hydrology*, 472, 99-110

Lorrain-Soligon, L., Marchand, E., Alliot, F., Bustamante, P., Petit, F., and Goutte, A. (2025). Starting from the bottom: Contrasted trophic transfer of antibiotics and pesticides through a riverine food web. *Science of The Total Environment*, 1002, 180617.

Marchand, E., F. Petit, F. Alliot, H. Blanchoud, D. Costantini, E. Guigon, N. Martin, S. Traore, and A. Goutte (2024). Contrasted Antibiotics and Pesticides Occurrence in Fish Exposed In Situ to Urban Effluents: A 20-Day Caging Experiment. *Environmental Toxicology and Chemistry* 43:701–711.

Owens P.N. and Rutherford P.M., (2023). Concentrations and total mass storage of fine sediment, potentially toxic elements (PTEs) and phosphorus in the channel bed of an urban river: a multi-year study. *Journal of Soils and Sediments*, 23:3658–3670

Quantin C. and D. Guinoiseau (2022). The use of stable isotopes in soil science: Metals. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Second Edition, Springer, 10.1016/B978-0-12-822974-3.00092-6

Sumudumali, R. G. I. and Jayawardana J. (2021). A Review of Biological Monitoring of Aquatic Ecosystems Approaches: with Special Reference to Macroinvertebrates and Pesticide Pollution. *Environmental Management* 67 : 263-276

Tachet, H., Richoux P., Bournaud M., Usseglio-Polatera P. (2010). Invertébrés d'eau douce, systématique, biologie, écologie. CNRS Editions

Tockner et al., 2022 Rivers of Europe 2d ed, Elsevier, 922p,

Yunker, M.B., Macdonald, R.W., Vingarzan, R., Mitchell, R.H., Goyette, D., Sylvestre, S. (2002). PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. *Organic geochemistry* 33, 489–515

Zhao F., Yan L., Tang J., Fang L., Yu X., Li M., Chen L. (2023). Urbanization–land-use interactions predict antibiotic contamination in soil across urban–rural gradients. *Science of the Total Environment* 867, 161493